

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Разработка предложений по повышению качества электроэнергии для ветряных, солнечных и приливных электростанций

Студент

О.Ш. Ошурбеков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., В.И. Платов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Содержание

Введение.....	6
1 Особенности конструкции ветряных, солнечных и приливных электростанций.....	10
1.1 Ветряные электростанции.....	10
1.2 Солнечные электростанции.....	14
1.3 Основные принципы построения гибридных систем электроснабжения.....	18
1.4 Приливные электростанции.....	21
1.5 Возможные проблемы с качеством электроэнергии.....	25
2 Повышение качества и энергоэффективности элементов ветряных, солнечных и приливных электростанций.....	29
2.1 Способы повышения качества электроэнергии, вырабатываемой ветровыми и солнечными электростанциями за счет модернизации алгоритмов управления.....	29
2.2 Оптимизация режимов работы накопителей электроэнергии.....	49
2.3 Способы повышения качества электроэнергии, вырабатываемой ветровыми и солнечными электростанциями за счет технических средств.....	54
2.4 Оптимизация систем электроснабжения с участием ветряных и солнечных электростанций.....	62
3 Вопросы оптимизации технико-экономических характеристик систем электроснабжения.....	67
3.1 Техничко-экономические аспекты проектирования гибридных электростанций.....	67
3.2 Методы оптимизации систем электроснабжения с участием ветряных, солнечных и приливных электростанций.....	70
Заключение.....	76
Список используемых источников.....	78

Введение

Качество электроэнергии зависит не только от устройства, генерирующего энергию, но и главным образом от системы, т.е. совокупности множества электрических приборов и устройств, через которые электрическая энергия передается от места производства к месту потребления [30].

С появлением и массовым внедрением альтернативных источников энергии (возобновляемых источников энергии) вопросы получения качественной электроэнергии напрямую стали связываться с энергоэффективностью как отдельных элементов, входящих в систему электроснабжения (ветрогенератор, фотоэлемент, аккумуляторная батарея, инвертор и т.д.), так и всей системой (ветро-фото электростанция, приливная гидроэлектростанция и т.д.)

Ветряные, солнечные и приливные электростанции относятся к так называемым возобновляемым источникам энергии. В отличие от углеводородного топлива, которое в настоящее время находится на первом месте по потреблению на теплоэлектростанциях, запасы возобновляемой энергии считаются неисчерпаемыми. Это особенно важно в связи с тем, что в настоящее время во всем мире уделяется повышенное внимание экологическим проблемам. Глобальные экопроблемы можно не замечать, можно игнорировать, но от этого они не становятся меньше. Главная из них, по мнению Организации объединенных наций (ООН), это изменение климата. Смена климата происходит незаметно, по несколько десятых градусов за тысячелетия, но учитывая возраст планеты Земля в 4,54 миллиарда лет, данный процесс идет очень быстрыми темпами. По отчетам ООН, на изменение климата сильно влияют продукты сгорания ископаемых видов топлива, энергия сгорания которых и превращается в электрическую. Решение данной проблемы позволит снизить, или даже остановить процесс изменения климата, что позволит спокойно и грамотно подойти к другой

экологической проблеме – выбросы продуктов жизнедеятельности промышленных предприятий, также наносящих огромный вред окружающей среде.

Неисчерпаемыми источниками энергии считаются в первую очередь солнце и ветер, а кроме них это морские приливы, геотермальные источники, биотопливо и некоторые другие, менее эффективные источники. На первый взгляд все очень просто – источники энергии известны, устройства для превращения альтернативной энергии в электрическую разработаны и изготовлены, бери и пользуйся. Но это просто только на первый взгляд. На ведущие роли выходит экономическая составляющая массового применения альтернативных источников энергии. Несколько десятилетий назад, ветрогенераторы, фотоэлектрические элементы, гидрогенераторы для альтернативной энергетики стоили очень дорого и однозначно проигрывали конкуренцию традиционным электростанциям. Но значительные усилия ученых, производителей электротехнической продукции, правительств ведущих мировых государств позволили сделать альтернативную энергетику более конкурентоспособной. Например, в большинстве стран мира стоимость электроэнергии вырабатываемой ветряными электростанциями без финансовой поддержки правительства составляет 0,05-0,09 \$ или 4-8 руб за один кВт·ч. Это дороже традиционных электростанций, но уже не так значительно. Развитие технологий Smart Grid (умные сети, цифровые подстанции) решило большинство технических проблем по интеграции альтернативных источников энергии в существующие электрические сети.

Актуальность работы.

Проблема качества электроэнергии и её актуальность в нашей стране существует много лет. Причем ее острота возрастает по мере удаления от мест ее генерации. Основными «показателями качества электроэнергии являются:

- установившееся отклонение напряжения;
- размах изменения напряжения;

- доза фликера;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения;
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности;
- отклонение частоты;
- длительность провала напряжения;
- импульсное напряжение;
- коэффициент временного перенапряжения» [1].

Качество электроэнергии зависит не только от источника, генерирующего энергию, но и главным образом от системы, т.е. совокупности множества электрических приборов и устройств, через которые электрическая энергия передается к месту потребления.

Таким образом, разработка предложений по повышению энергоэффективности альтернативных производителей энергии (ветряных, фотоэлектронных и приливных генерирующих устройств) позволяющих повысить характеристики электроэнергии, является актуальной задачей.

Цель работы.

Целью данной работы является разработка предложений по повышению качества электроэнергии для ветряных, солнечных и приливных электростанций.

Объектом исследования являются ветряные, солнечные и приливные электростанции.

Предметом исследования является качество электрической энергии и энергоэффективность ветряных, солнечных и приливных электростанций.

Задачи исследования.

1. Проанализировать показатели качества электроэнергии и факторы, их обеспечивающие.

2. Разработать предложения по повышению качества электроэнергии для ветряных, солнечных и приливных электростанций.

Практическая значимость.

Разработанные предложения по повышению энергоэффективности альтернативных источников энергии позволяют повысить качество вырабатываемой электроэнергии, повысить их привлекательность перед потребителями.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Предложения по повышению качества электроэнергии для ветряных, солнечных и приливных электростанций.

Новизна магистерской диссертации.

1. Новизна работы заключается в разработке и применении алгоритмов управления и технических средств, для повышения качества электроэнергии, вырабатываемой ветряных, солнечных и приливных электростанций, основанных на анализе и обобщении последних технических достижений в области применения альтернативных источников энергии.

Вопросы повышения качества электрической энергии большое внимание уделяется у таких отечественных авторов научных работ как Светлицкий С.Ю., Логинов Е.Л., Вайнзихер Б.Ф., Ледин С.С., Игнатичев А.В., Иванов С.Н., Безруких П.П. и др.

Из электронных ресурсов можно выделить информационные порталы Energosovet.ru, Minenergo.ru, Solarhome.ru, Neftegaz.ru, Energetika.ru, gigavat.com и др.

Издаются периодические издания: журналы «Альтернативная энергетика и экология», «Энергосбережение», «Энергоэффективность и энергосбережение», «Вестник МЭИ», «Главный энергетик» и др.

Структура и объём работы.

Структура: введение, 3 раздела, заключение, список использованной литературы.

Пояснительная записка содержит 83 страницы машинописного текста.

1 Особенности конструкции ветряных, солнечных и приливных электростанций

1.1 Ветряные электростанции

В последнее время во многих странах мира все больше внимания уделяется экологическим проблемам, связанным с жизнедеятельностью промышленных предприятий, но и не только. На экологию влияют многие факторы, а не только развитие производства, увеличение автотранспорта, но и другие более объективные проблемы, связанные с жизнедеятельностью животного и растительного мира на планете. Многие отрицательные экологические воздействия связывают с так называемыми парниковыми газами. Уменьшение количества выбросов парниковых газов является одной из экологических программ поддерживаемых многими мировыми странами в перспективе до 2050 года, на который намечено трехкратное уменьшение выбросов по сравнению с годом 2020. Одним из путей решения данной проблемы является использование альтернативных источников энергии, при использовании которых получается электрическая энергия. В первую очередь к таким относятся альтернативные преобразователи энергии ветра, солнца и перемещение водных масс в океане. Что касается развитие производства электрической энергии за счёт ветра, то в планах ведущих стран указывается цифра в 20%, на которые должна будет приходиться выработка электричества ветроэлектростанциями в процентах от общего количества электростанций. Во многих индустриально развитых странах мира электрическая энергия вырабатывается ветряными станциями уже достаточно продолжительное время. Ветряки широко представлены в таких странах как Голландия, Австралия, Соединённые Штаты Америки и другие. В странах первой двадцатки по экономическому развитию, всё меньше становится барьеров технического характера, сдерживающих развитие ветряной энергетики: генераторы становятся более производительными и

надежными, с высокими энергетическими характеристиками. При этом стоимость комплектующих неизменно уменьшается. Очевидно, что сила ветра отличается от одной страны к другой, поэтому и развитие идёт не равномерно - в каких-то странах более развивается ветроэнергетика, в каких-то менее. Преимущества здесь имеют страны с продолжительной береговой линией, так как именно на побережье зачастую сила ветра более значительная, нежели в материковой части. Известно, что стоимость электричества, полученного от ветрогенератора, напрямую зависит от силы ветра - чем он выше, тем большее количество электроэнергии вырабатывается, соответственно и себестоимость её выработки уменьшается. Но несмотря на это, по экономическим причинам развитие ветроэнергетики идет относительно медленно. И здесь важно рассматривать производство электричества от альтернативного источника, использующего силу ветра и с других точек зрения. В первую очередь с политической точки зрения. Нужно учитывать необходимость сохранности полезных ископаемых для будущих жителей нашей планеты, в первую очередь углеводородного характера. Этот вопрос является достаточно острой проблемой, которую нужно решать уже сейчас, чтобы данные полезные ископаемые были в будущем. Но все-таки, несмотря на сдерживающие экономические показатели, недостаточность политической воли руководителей многих стран, ветроэнергетика развивается не быстро, но достаточно целенаправленно и можно смело говорить, что она займет свое достойное место среди альтернативных источников энергии.

Рассматривая альтернативные источники энергии, принято их сравнивать между собой и традиционной электроэнергетикой по двум основным параметрам - это технический потенциал и практический потенциал. Под практическим потенциалом подразумевается то, что уже реализовано в данный момент, то есть непосредственно какое количество электроэнергии вырабатывается данными видами электрических станций. Технический потенциал это такая теоретическая величина, которая

предварительно оценивает возможность того или иного альтернативного источника энергии в плане выработки им электрической энергии. Учитывая новизну данного направления в энергетической отрасли сейчас используется большое количество разнообразных методик для сравнения альтернативных источников между собой. Но есть уже определенные средние величины, на которые можно ориентироваться. Например, теоретическая энергия ветра, то есть его технический потенциал оценивается в 180 ЭДж/год (50 000 ТВт·ч/год). Именно такое количество электрической энергии теоретически можно получить используя абсолютно всю энергию ветра. Цифра безусловно очень большая и наверное стоит к ней относиться довольно скептически. Но даже если уменьшить технический потенциал ветра в несколько раз, то мы получим совершенно большую цифру, примерно на девяносто процентов превосходящую все мировые запросы на потребление электрической энергии. Как уже было сказано на берегу технический потенциал ветра оцениваются гораздо выше, чем в материковой части. В процентном распределении примерно 30% приходится на материковую часть и 70% соответственно на побережье. Если приводить цифры, то технический потенциал прибрежных электростанций находится в пределах 15-130 ЭДж/год (4000-37000 ТВт·ч/год). Поэтому большинство электростанций, построенных на сегодняшний момент, преимущественно располагаются в береговой части. Увидев такой большой технический потенциал, прибрежные государства стараются побыстрее развить у себя ветроэнергетику. Большое количество электростанций уже построены и функционируют. Разрабатывается большое количество новых проектов - более мощных, с улучшенными показателями себестоимости выработки киловатт электроэнергии на единицу затрат. Всё это непосредственно развивает ветроэнергетику, но всё равно, на сегодняшний момент она развита недостаточно, её технический потенциал используется крайне слабо.

Как любой другой технический объект, ветряные электростанции прошли свой относительно небольшой путь развития от проектов маленьких

действующих макетов первых ветряных станций до фундаментальных сооружений, которые уже сложно назвать ветряками. Современные ветрогенераторные станция это сложное техническое сооружение, включающее в себя как строительную часть, причём подземную и наземную, так её непосредственно генерирующую часть, включающая в себя непосредственно генератор электрической энергии и большое количество технических устройств, позволяющих управлять поворотом лопастей, изменением угла атаки ветра и другими параметрами, влияющими на эффективность работы ветрогенератор. Экономические законы, указывающие на то, что при массовом производстве себестоимость выпуска продукции снижается, в полной мере относится и к себестоимости электроэнергии – чем больше ветряная электростанция, тем дешевле вырабатываемая электроэнергия. На рисунке 1 показано как изменялся диаметр лопастей и высота строительной части ветряных станций за последние несколько десятилетий. В настоящее время спроектированы и начато строительство ветряных станций имеющих высоту 300 м диаметр лопастей турбины в 250 м и суммарным количеством вырабатывает энергии более чем 20 Мб.

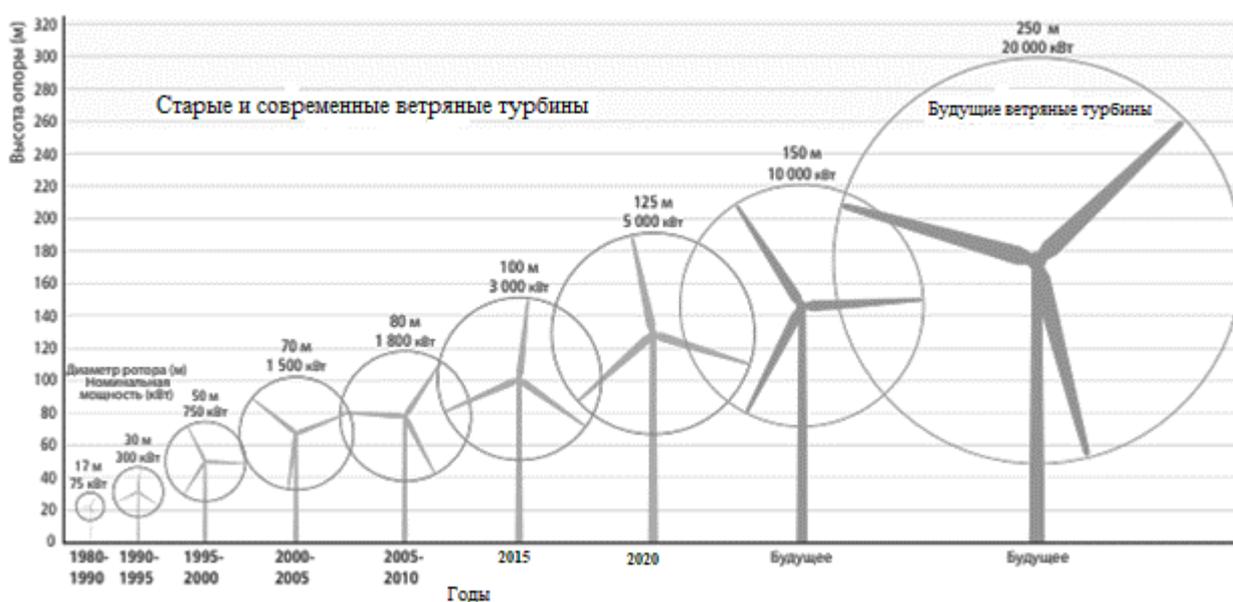


Рисунок 1- Развитие ветряных электростанций

1.2 Солнечные электростанции

Солнце, как источник энергии, интересовало человека с давних времён. Одной из первых технологий в которых использовалась энергии был простой нагрев воды или помещения. Человек уже в давние времена пытался усилить воздействие солнечной энергии применяя зеркала и фокусируя с их помощью лучи света в той или иной точке. Этот способ использования солнечной энергии очень долго оставался единственным. Лишь в 20 веке с развитием современных технологий полупроводниковых материалов и созданием искусственных новых материалов, появились другие, более современные технологии использования солнечных лучей для производства электрической энергии. В зависимости от способа использования, солнечные технологии можно разделить на три основные части. К первой относится тепловая солнечная энергетика, которая способна нагреть воду или например подогреть воду в бассейне в странах с мягким климатом. А, например, с применением солнечного коллектора, можно отапливать здание. Вторая группа технологий - это использование солнечной энергии для производства или выработки электрической энергии [22]. Преобразование одного вида энергии в другой происходит в солнечных фотоэлектрических преобразователях. Если собрать множество таких фотоэлементов в одном месте, мы получаем солнечную электростанцию. К третьей группе технологий относится комбинация первой и второй, когда с помощью специальных устройств фокусируются солнечные лучи в определенной точке. Концентрация лучей резко увеличивается, соответственно увеличивается и тепловое воздействие на поверхность. Это позволяет нагреть поверхность до очень высоких температур. В частности воду можно превратить в пар, а уже энергию пара используют для производства электрической энергии.

В случае если используется непосредственное воздействие солнечных лучей на устройство, то принято говорить о прямом воздействии солнца.

Именно по прямому воздействию оценивается технический потенциал фотоэлементов или солнечных станций. Количество солнечной энергии, которая вырабатывается поверхностью солнца и которая достигает поверхности Земли составляет примерно 1367 Вт на квадратный метр поверхности Земли. Это значение посчитано при угле падения солнечных лучей на поверхность земли в 90 градусов. При изменении угла падения, количество энергии уменьшается. Поверхность земли подвергается воздействию как прямого излучения, так и рассеянного, за счёт отражения солнечных лучей от земных объектов и космических тел. Благодаря рассеянной радиации мы имеем возможность получения электричества от фотопреобразователей не только в солнечную погоду, но и в пасмурные дни. Технический потенциал солнечной энергии оценивается приблизительно $3,9 \cdot 10^6$ ЭДж/год. [23]. Видно, что технический потенциал солнечной электроэнергии ниже чем подобный у ветряной энергии, но всё равно данной величины достаточно для удовлетворения потребностей всех жителей Земли в электроэнергии. На рисунке 2 показаны практические технологии которые применяются в настоящее время для преобразования солнечной энергии.

Как уже было сказано, для того чтобы преобразовать солнечную энергию в электрическую, используются специальные полупроводниковые элементы, получившие названия фотоэлементы. Их принцип действия основан на свойства р-п перехода, который заключается в том, что электроны, входящие в состав пластины р-типа и n-типа, могут под воздействием различных видов энергии, менять своё пространственное положение в кристаллической решётке. Таким воздействием могут быть электрическое поле, магнитное поле, различные виды радиации и температура. В нашем случае речи идет о воздействии световой энергии (фотонов), под воздействием которой часть электронов в районе соприкосновения слоев разной проводимости становится активной и концентрируется на одной из поверхностей. В результате происходит разделение зарядов.

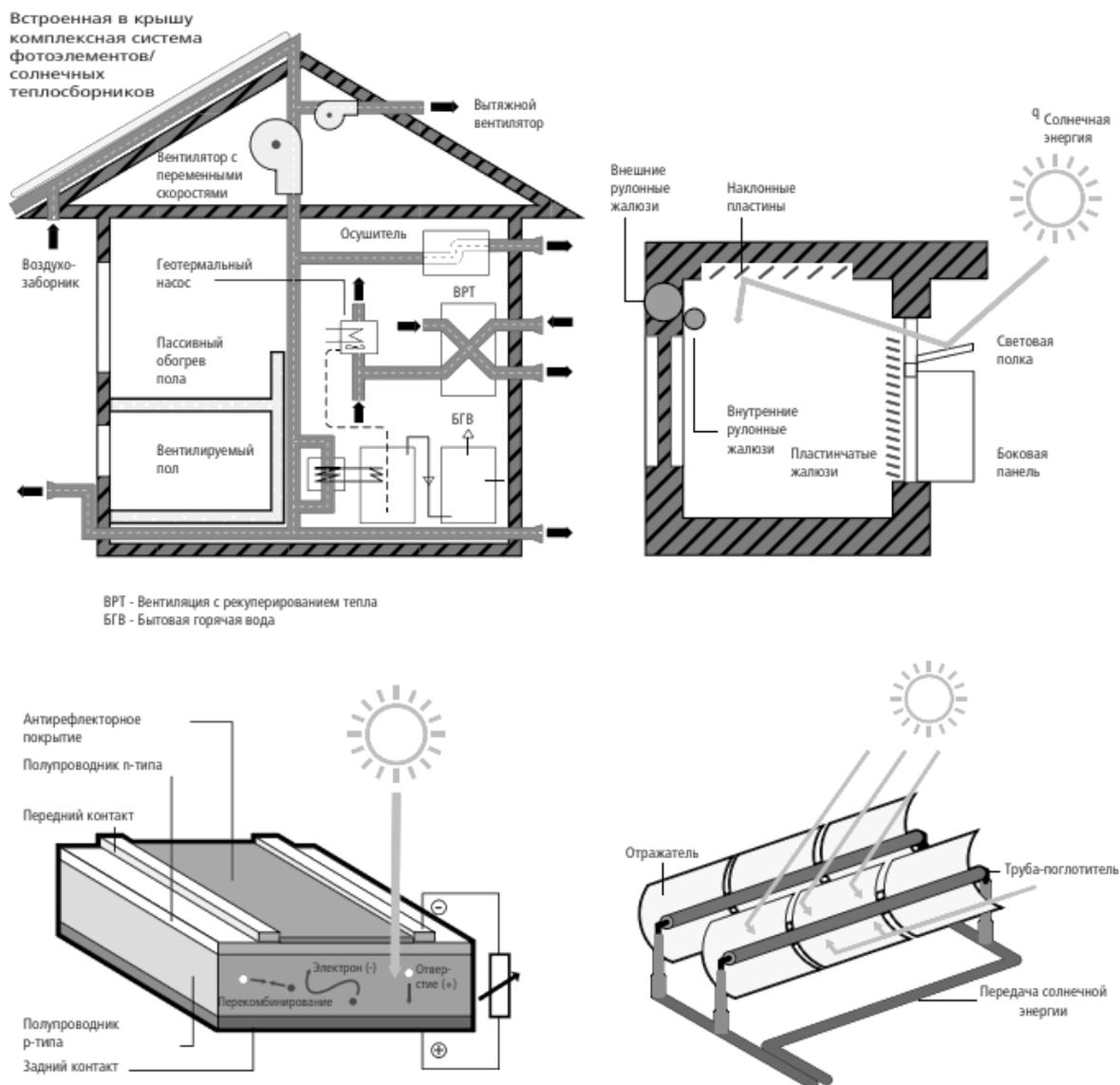


Рисунок 2- Отдельные примеры использования лучистой теплоэнергии: вверху - совмещенное со зданием; внизу слева- прямое преобразование; внизу справа- параболоцилиндрический коллектор

Пластина, из которой произошел исход электронов, становится с уменьшенным количеством электронов и приобретает свойства пластины р-типа. Соответственно другая приобретает свойства пластины n-типа. Из-за разности потенциалов можно говорить о том, что между пластинами возникает электрическое напряжение и если их соединить друг с другом через вещество, обладающее электрической проводимостью, а значит и электрическим сопротивлением, это вызовет протекание электрического

тока, а значит мы можем говорить о том, что произошла выработка электрической энергии [24].

Промышленностью освоено производство фотоэлементов из следующих материалов:

- медь-индиядисульфида/диселенида галлия;
- теллурида кадмия (CdTe);
- органического кремния;
- арсенида галлия (GaAs)).

Для концентрации солнечной энергии перечисленные материалы располагают в точках концентрации солнечной энергии с помощью различных отражающих элементов (зеркал, коллекторов).

Наиболее дешевыми в производстве оказались фотоэлементы на основе кремния. Им принадлежит около 80% рынка всех фотоэлементов, даже несмотря на то, что они обладают наименьшим коэффициентом полезного действия из всех перечисленных (от 10 до 20% в зависимости от примесей).

Так как размеры одного фотоэлемента очень незначительные, то и количество электричества, которое он способен выработать, также очень маленькое. Поэтому фотоэлементы для производства электроэнергии, используются только в составе модулей. В случаи применение фотоэлементов для производства относительно большого количества электричества, фотоэлементы собирают в фотоэлектрические модули с наиболее распространенным размером 1 м на 1.5 м. Фотоэлектрическая панель такого размера способна обеспечить электроэнергией небольшое количество потребителей. Например, если речь идёт о жилом доме, ее хватает для освещения и питания маломощных потребителей, таких как телевизор, холодильник или компьютер. Поэтому солнечные панели не используются в одиночку, из них составляется солнечная электростанция (см. рисунок 3) Гарантийный срок работы ФЭ составляет от 20 до 30 лет.



Рисунок 3- Пример небольшой солнечной электростанции на 3,1 кВт·ч/сутки

1.3 Основные принципы построения гибридных систем электроснабжения

При разработке совместных ветро-солнечных генераторов, используемых как в составе общей структуры, так и в качестве источников независимого энергоснабжения, существенной конструкционной трудностью является формирование баланса производства и потребления энергии в зависимости от конструкционных возможностей оборудования и требований потребителей (наиболее важно в пиковое время). Частично эта проблема решается при применении буферного промежуточного сбережения энергии в объеме, достаточном для будущего покрытия пиковых часов нагрузки в соответствии с требованиями потребителей. Далее, из-за обеспеченного баланса выработанной, аккумулируемой и отданной энергии достичь реализации основной функции генерирующей структуры – обеспечить постоянство снабжения потребителей. В настоящее время массово распространена концепция объединения, заключающаяся в применении в составе совместного ветро-солнечного агрегата многофункциональных модулей, реализующих совмещенные функции: изменения, накопления и производства энергии (в комплексе с активным ограничением величины энергии, передающейся от ветроагрегата и батарей солнечных панелей в

накопители в случае изменения в широком диапазоне величины энергии ветра и солнечной энергии), а также изменения необходимости в выходной энергии в связи с изменением нагрузки в сети потребителей [25]. Данный подход позволяет объединить в едином комплексе преобразование энергии альтернативных источников различных конструкций в электрическую, ее многоуровневое накопление и преобразование в образцовую электроэнергию для клиента (тем самым значительно повысив эффективность применения энергии возобновляемых источников).

Структурная схема примера реализации варианта независимой энергосистемы с совмещенным ветро-солнечным агрегатом, реализующей рассмотренную выше тенденцию, приведена на рисунке 4. Система содержит в себе функциональные элементы: комплект солнечных панелей 1 с процессором 2, систему управления 3, трансформатор 4, два генераторных модуля 5 и 9, автомат зарядки 6, блок аккумуляторов 7, преобразователь 8 и ветряк 10, механически объединенный с генераторным блоком 9. В рассматриваемой энергосистеме функцию энергопреобразования выполняют генераторные блоки на основе емкостного накопителя энергии движения. Применительно к выполняемой функции буферный накопитель кинетической энергии имеет конструкцию в виде тяжеловестного ротор-маховика круглой конструкции из немагнитного материала с расположенными в нем по окружности постоянными магнитами, вращающегося в воздушном зазоре между двумя радиально расположенными статорами, выполненными в виде U-образных магнитопроводов с обмотками в виде катушечных групп.

Полюсные башмаки статоров обращены к ротору-маховику и связаны общим индукционным потоком с постоянными магнитами, размещенными в роторе-маховике. При вращении ротора в обмотках статоров появляется ЭДС.

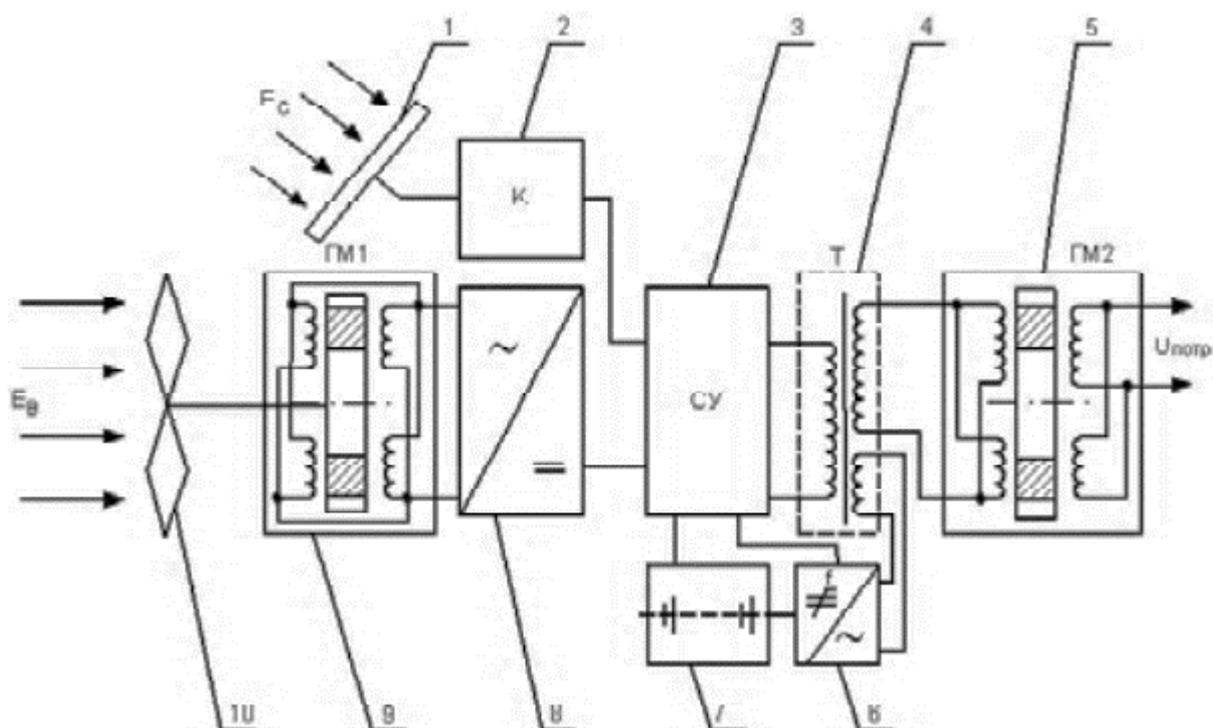


Рисунок 4- Структурная схема одной из конструкций автономной энергосистемы с гибридной ветро-солнечной электростанцией: F_c - энергия солнечного излучения; E_B - энергия ветра

При этом в зависимости от способов соединения обмоток статоров и привода ротора буферный накопитель, как показали экспериментальные работы, может выступать в качестве: электродвигателя, генератора вырабатываемой энергии и обобщенные функции двигателя-маховика [26]. Причем, функцию накопителя кинетической энергии он выполняет при вращении в любом случае. Первый генераторный блок 9 механически объединен с ветроагрегатом 10 и предназначен для эффективного преобразования силы ветрового потока в электрическую энергию без предъявления требований к ее качеству. Так как ротор генераторного блока приводится в движение ветроагрегатом, обе части модуля используются в генераторном режиме, что повышает эффективность генерации энергии от силы ветра.

1.4 Приливные электростанции

Как известно что 70% поверхности планеты занимает вода. Причём вода Да очень редко находится в состоянии покоя постоянно перемешивается что происходит под различными предлогами и воздействие. Перемещение воды называется печеньями приливами и отливами и волнами. Каждое из перечисленных названий является источником энергии которую можно извлечь из океана первую очередь технический потенциал различных видов источников энергии показан в таблице 1.

Таблица 1 – Технический потенциал использования океанской энергии для производства электрической энергии

Процесс	Распространенность	Теоретическое количество электроэнергии, ЭДж/год
Волны	Повсеместно, во всех морях и океанах (см. рис. 5, а)	116
Приливы – уровень воды	В определенных местах (см. рис. 5, б)	0,05
Приливы - течения	В определенных местах	0.12-0,17
Течения	Только в океанах, морские недостаточно «сильные»	0,25
Разность температур у поверхности и в глубине	Повсеместно ближе к экватору, во всех морях и океанах (см. рис. 5, с)	160
Разность солености воды моря/океана и рек, впадающих в них	В устьях только крупных рек	6

Как видно из таблицы 1, наибольшее количество энергии приходится на волны, которые возникают в результате воздействия ветра. Другими словами энергия ветра сначала преобразуется в энергию волн, а затем уже человек преобразует энергию волн в электрическую [27].

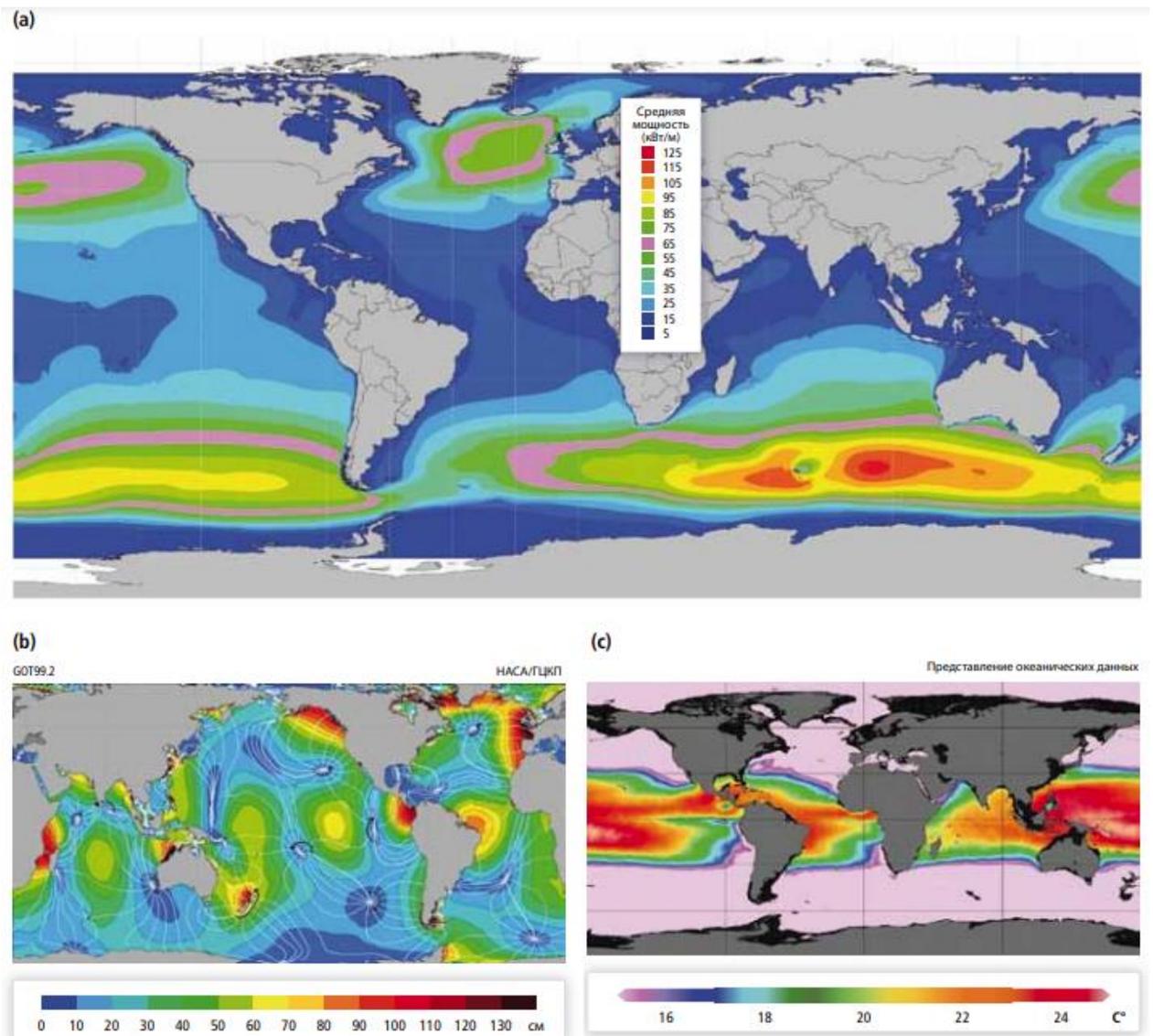


Рисунок 5- Глобальное распределение известных энергоресурсов океана: а- энергия волн; б- амплитуда прилива, с- тепловая энергия океана

На втором месте по запасом энергии являются источники значительной разности температур воды. Известно, что на глубине более 1000 м, куда практически не проникают солнечные лучи, температура вода близка к нулю. Поверхность же воды наоборот нагревается вследствие поглощения солнечной радиации. То есть мы видим, что опять происходит преобразование солнечной энергии в тепловую на поверхности воды, и уже человек в состоянии преобразовать полученную разность температур в электроэнергию. Значительно более низким потенциалом обладают

океанские течения и изменение уровня воды во время отливов и приливов. На протекание этих процесса оказывают влияние гравитационные процессы на планете, изменение фаз луны и солнца, то есть данные процессы будут происходить до тех пор, пока вокруг планеты существует атмосфера. На скорость течений, помимо силы ветра, также оказывают значительное влияние термохалинная циркуляция воды [28].

Из-за относительной медлительности перемещение водных масс существует определенные практические трудности с извлечением пользования из данных процессов. Но, несмотря на это, разработано большое количество различных способов и методов позволяющих преобразовывать данные виды океанской энергии. Здесь лидируют технологии использующие изменения амплитуды уровня воды во время прилива и отлива. Как видно из рисунков 6...9, необязательно на напрямую воздействовать на рабочий механизм генераторов, приводя его вращение. Энергию воды можно использовать косвенно. Например на рисунке 6 ротор генератора приводится во вращение воздухом, который выдавливается из подводного резервуара при проходе гребня волны и поступающего в данный резервуар при проходе нижней части волны через входящий атмосферный воздухозаборник.

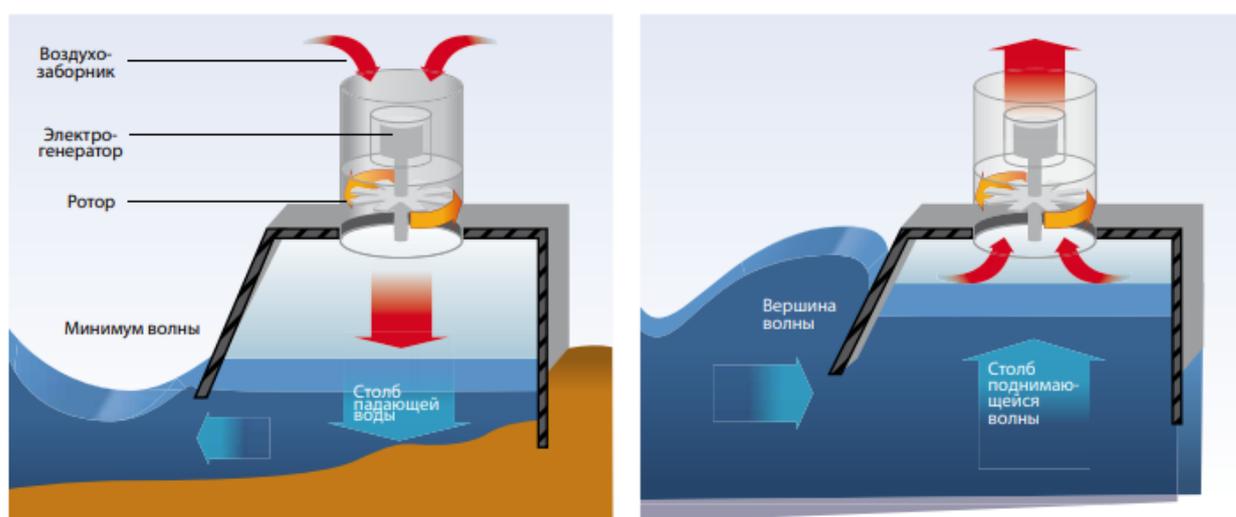


Рисунок 6- Установка с осциллирующим водяным столбом

Таким образом ротор генератора находится под воздействием однонаправленного воздушного потока.

Другим примером непрямого воздействия воды может служить метод показанный на рисунке 7. Электростанция представляет собой переливное устройство, в нижней части которого расположены турбины генератора [29]. Вода заливается через верхнюю часть при больших волнах или при приливе. К более простым в техническом плане являются конструкциями использующие течение для вращения турбин напрямую (см. рисунок 9)

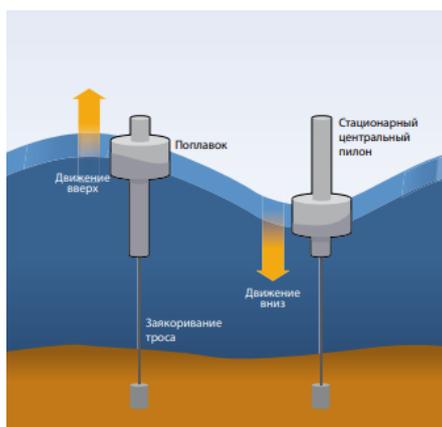


Рисунок 7 - Устройство с периодическим заглублением

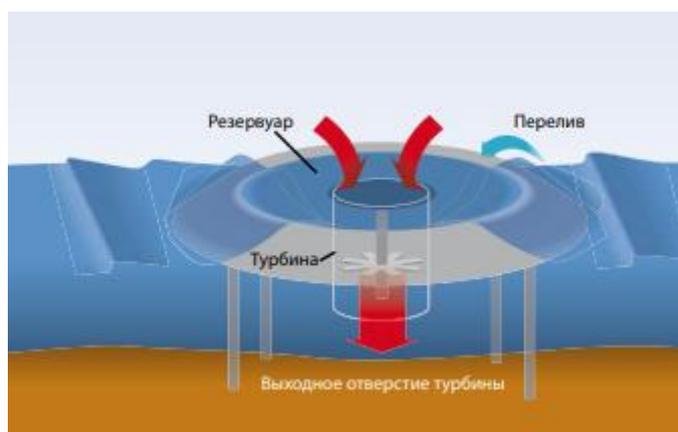


Рисунок 8 - Переливное устройство

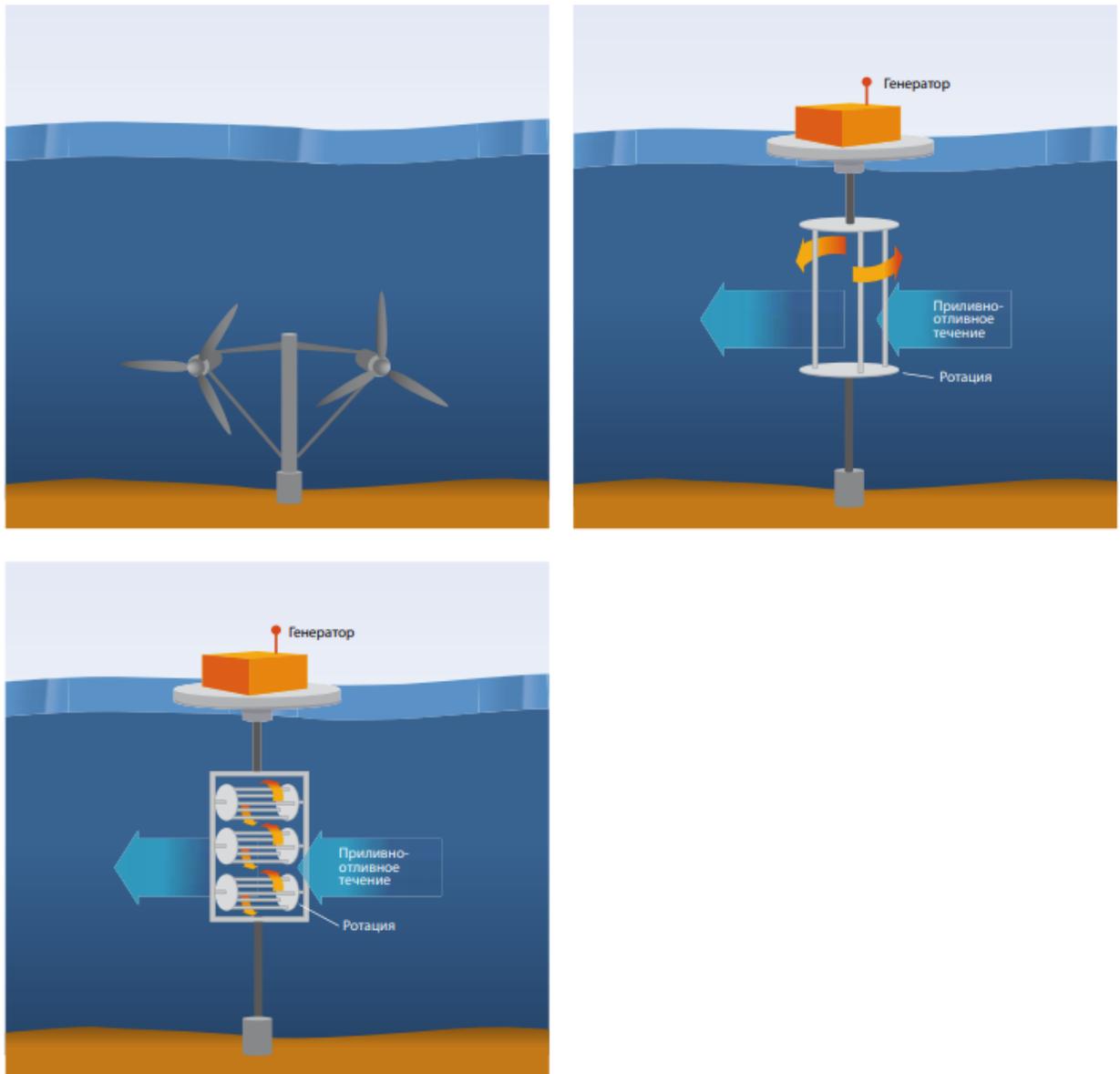


Рисунок 9 - Преобразователи приливо-отливных течений: (вверху слева) двоянная турбина с горизонтальной осью; (внизу слева) устройство с перекрестным потоком; и (вверху справа) устройство с вертикальной осью

1.5 Возможные проблемы с качеством электроэнергии

«Наиболее часто потребители электроэнергии встречаются с следующими видами искажения напряжения в системах электропитания:

- импульсные помехи и высокочастотный шум;
- повышенное или пониженное напряжение;

- отклонение частоты или гармонические искажения напряжения;
- искажение напряжения при переходных процессах;
- кратковременные перебои или полное пропадание электропитания.

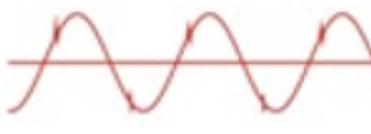
Эти помехи вызываются различными причинами, включая аварии, проблемы при переключениях в кабельных сетях и распределительных устройствах, работа мощного промышленного оборудования, экстремальные погодные условия. Проблемы с электропитанием могут приводить к снижению производительности, выходу из строя оборудования, ухудшению качества продукции, ошибкам в обработке данных, рискам потери важной информации и т.д» [2].

В таблице 1 показаны основные виды помех напряжения, присутствующие в системах электропитания заводских и бытовых электроприемников, причины их вызвавшую и средства борьбы.

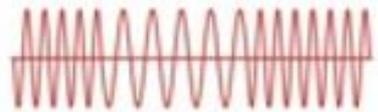
Таблица 1 – Виды искажения U и средства и средства борьбы с ними

Графическая иллюстрация помехи	Краткая характеристика	Источник помехи	Способ борьбы с помехой
	Импульсы напряжения от 50В до 6 кВ с коротким передним фронтом и длительностью от 0,5 мкс до 2 мс	Включение или выключение мощных нагрузок, срабатывание предохранителей, грозовые разряды	Варисторные ограничители перенапряжений
	Высокочастотные электромагнитные помехи от 10 кГц до 100 МГц, амплитудой от 0,1 мВ до 100В	Воздействие от импульсных источников питания, устройств регулирования частоты, наводятся из эфира	Сетевые фильтры высокочастотных помех

Продолжение таблицы 1

Графическая иллюстрация помехи	Краткая характеристика	Источник помехи	Способ борьбы с помехой
<p>Провалы (просадки) напряжений</p> 	<p>Снижения напряжения не более чем до 80% на время более 20 мс</p>	<p>Подключение мощных нагрузок, мягкие электросети, короткие замыкания в сетях</p>	<p>Стабилизатор напряжения, источник бесперебойного питания</p>
<p>Выбросы (повышение) напряжения</p> 	<p>Увеличение напряжения до 115% и выше на время более 20 мс</p>	<p>Выключение мощных нагрузок, переключения в электросетях</p>	<p>Стабилизатор напряжения, источник бесперебойного питания</p>
<p>Флюктуация (колебания) напряжения</p> 	<p>Периодически повторяющиеся изменения напряжения</p>	<p>Пульсирующая, нестабильная нагрузка</p>	<p>Источник бесперебойного питания</p>
<p>Выбросы (просечки) напряжения</p> 	<p>Периодически повторяющиеся выбросы и провалы напряжения на периоде 20 мс</p>	<p>Коммутация диодов, тиристоров, выпрямителей, преобразователей</p>	<p>Фильтры высших гармоник</p>
<p>Искажение синусоидальной формы напряжения</p> 	<p>Наличие высших гармоник напряжения</p>	<p>Влияние работы выпрямителей, фазовых регуляторов, нелинейных нагрузок</p>	<p>Компенсаторы мощности искажения</p>

Продолжение таблицы 1

Графическая иллюстрация помехи	Краткая характеристика	Источник помехи	Способ борьбы с помехой
<p>Вариации частоты (плавание)</p> 	Отклонение частоты от номинального значения	Низкое качество автономных источников энергии	Источник бесперебойного питания
<p>Прерывание напряжения (отсутствие)</p> 	Отсутствие напряжения в одной из фаз более 20 мс	Аварии в электросети	Источник бесперебойного питания

Выводы по разделу

Качество электроэнергии зависит не только от источника, генерирующего энергию, но и главным образом от системы, т.е. совокупности множества электрических приборов и устройств, через которые электрическая энергия передается от места производства к месту потребления.

Разработка предложений по повышению энергоэффективности альтернативных источников энергии (ветряных, солнечных и приливных электростанций) позволяющих повысить качество электроэнергии, является актуальной задачей.

Изучение современного состояния уровня техники и технологии в области производства, передачи и снабжения потребителей электрической энергией выявило основные направления, в которых возможно улучшение работы электрических сетей – более стабильные характеристики качества напряжения в области выбросов и просадки уровней, частотных колебаний, искажения формы, прохождения импульсов.

2 Повышение качества и энергоэффективности элементов ветряных, солнечных и приливных электростанций

2.1 Способы повышения качества электроэнергии, вырабатываемой ветровыми и солнечными электростанциями за счет модернизации алгоритмов управления

Отличительными чертами фотоэлектрических преобразователей и ветротурбин являются перемены их режимов эксплуатации в зависимости от энергетического потенциала основного энергоносителя и энергии, отдаваемой в сеть. Энергоэффективность режимов работы может существенно различаться. Для максимального режима мощности и энергии первичного энергоресурса и, соответственно, установленной мощности энергетического оборудования необходимо формировать оптимальные эксплуатационные режимы ветровых и солнечных электростанций. Главным фактором целенаправленного влияния на режимы эксплуатации рассматриваемых электростанций служит электрическая нагрузка. Показатель нагрузки может изменяться по определенным критериям в процессе подачи энергии на аккумуляторные накопители электрической энергии, или в процессе передачи энергии в электроэнергетическую сеть.

Фотоэлектрические станции применяют эффект прямого превращения солнечного излучения в электроэнергию, открытый в 1839 году европейским физиком Беккерелем. Преобразователи в своем большинстве представляют собой кремниевые полупроводниковые фотодиоды.

При поглощении света кристаллической структурой энергия фотонов передается электронам кристалла, что вызывает образование свободных носителей заряда. Носители заряда образуют потенциальный градиент в области р-п перехода, под влиянием которого возникает движение электронов через электрические проводники. Типичная величина разности потенциалов – 0,5 В, насыщенность фототока – 205 А/м² при удельной силе

солнечного излучения 1 кВт/м^2 . Типичные вольт-амперные характеристики фотоэлектрического элемента, при различных величинах инсоляции, показаны на рисунке 10. Из этих характеристик следует, что каждой ступени инсоляции соответствует текущий максимум генерируемой энергии. С максимумом мощности согласовываются ток и U фотоэлектрического модуля.

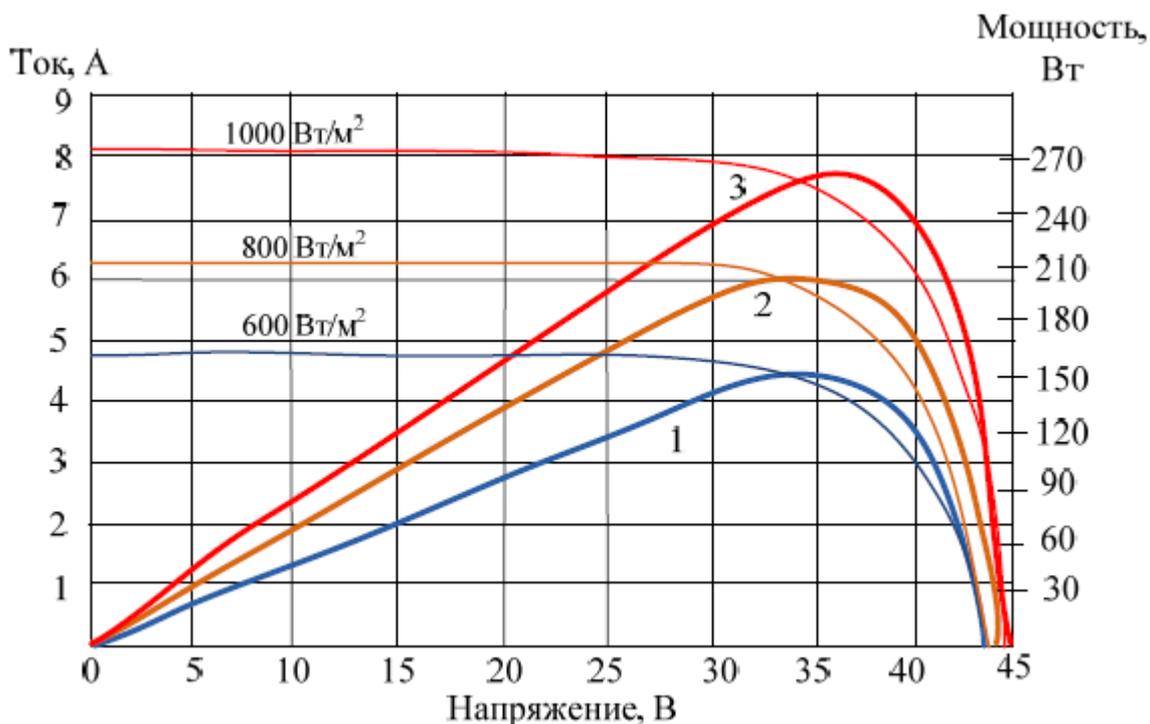


Рисунок 10- Вольт-амперные характеристики фотоэлектрического модуля при различной инсоляции

Следовательно, «возможность получать от фотоэлектрических модулей максимальную электрическую мощность реализуется подбором нагрузки, соответствующей текущей инсоляции и обеспечивающей генерацию максимальной мощности. Обычно, в качестве непосредственной нагрузки массива фотоэлектрических модулей используется аккумуляторная батарея со своим контроллером заряда или сетевой инвертор. Таким образом, эффективность использования мощности и энергии, генерируемой

фотоэлектрическими модулями, определяется свойствами контроллера заряда или инвертора» [3].

Известно, что мощность ветротурбины соразмерна кубу скорости воздушной массы. Однако, чтобы отдать максимум этой энергии электрической нагрузке, необходимо соответствующим образом найти ее величину. Ряд мощностных характеристик, преимущественно распространенных крыльчатых ветротурбин, приведен на рисунке 11.

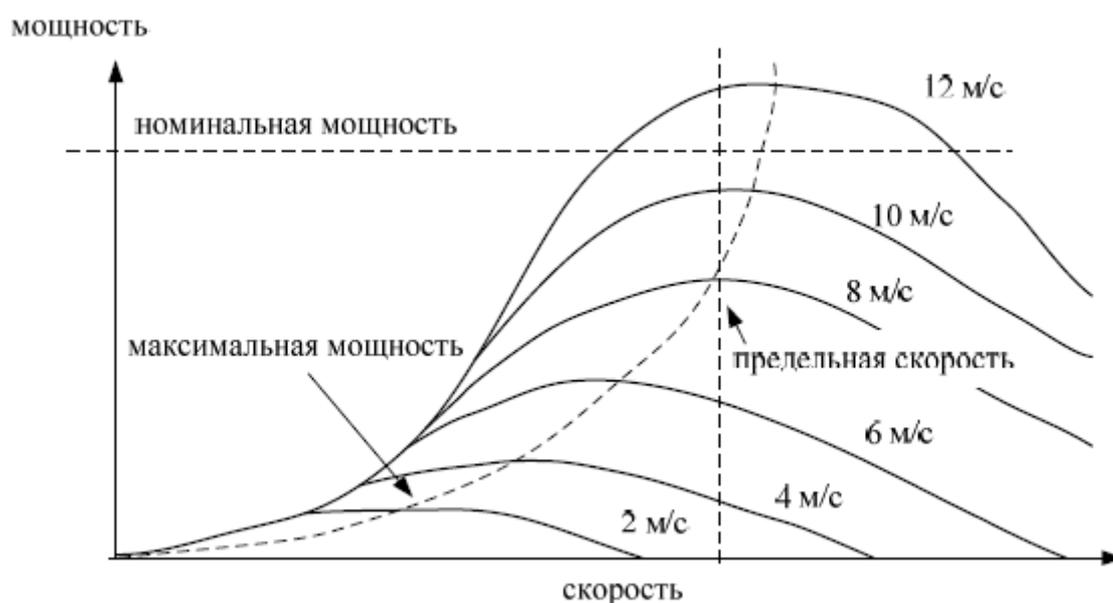


Рисунок 11- Мощностные характеристики ветротурбины

Следовательно, как и в случае с солнечными батареями, для согласования энергии ветрового потока с мощностью электрической сети необходимы соответствующие приборы заряда аккумуляторов или инверторы, обусловленные типом применяемого ветряного генератора.

Рассмотрим схему автономной фотоэлектростанции (см. рисунок 12). Важное значение для получения высоких энергетических характеристик имеют два ключевых блока – инвертор и контроллер. Основная их функция – изменение выходного напряжения или мощности для получения требуемых параметров или максимальной выходной энергии.

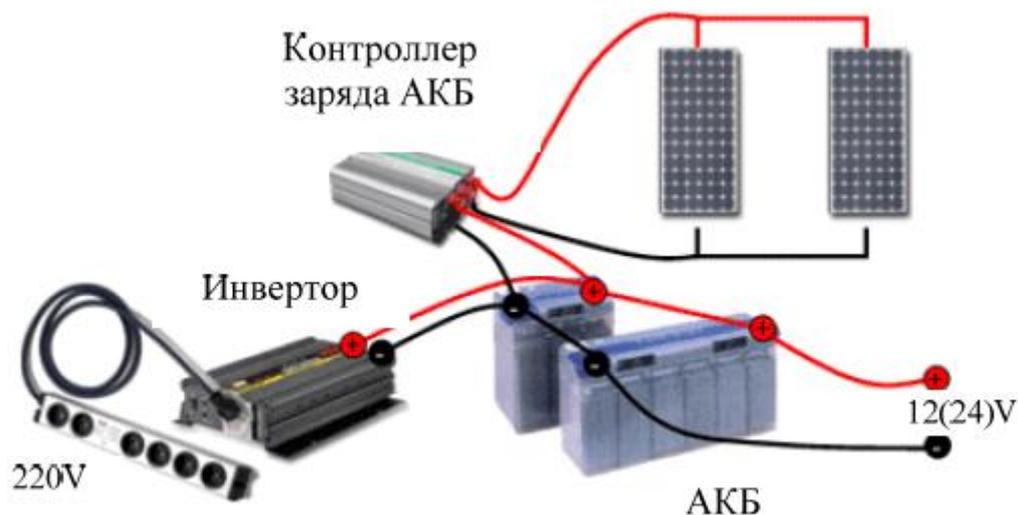


Рисунок 12- Схема автономной фотоэлектростанции

В своей работе контроллер функционирует по одному из двух алгоритмов:

- алгоритм работы на основе PWM (Pulse Width Modulation– широтно-импульсная модуляция (ШИМ));
- алгоритм работы на основе MPPT (Maximum Power Point Tracking– точка слежения за максимальной мощностью (ТММ)).

«ШИМ – это операция получения изменяющегося аналогового значения посредством цифровых устройств. Технологии ШИМ используются для получения прямоугольных импульсов – сигнала, который постоянно переключается между максимальным и минимальным значениями. Данный сигнал моделирует напряжение между максимальным значением и минимальным, изменяя при этом длительность времени включения максимального значения относительно длительности включения минимального (см. рисунок 13). Длительность включения максимального значения называется шириной импульса. Для получения переменных аналоговых величин изменяется ширина импульса. Данная технология

позволяет обеспечивать определенный уровень напряжения» [4]. Как правило, система Pulse Width Modulation снабжена электронным блоком с микропроцессорным контроллером.

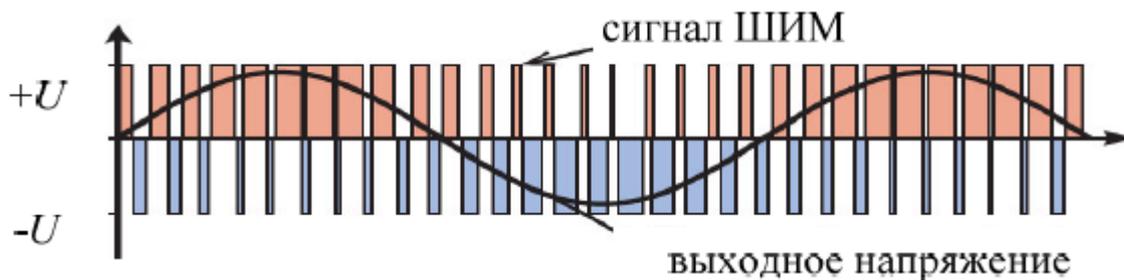


Рисунок 13- ШИМ сигнал и синусоидальное выходное напряжение

Контроллер с Pulse Width Modulation обеспечивает 100% уровень зарядки емкостных накопителей энергии. Происходит это в 4 стадии, каждая из которых выполняется автоматически в зависимости от измеренного уровня заряда батареи накопителей энергии. Графическая схема процессов заряда накопителей энергии показана на рисунке 14.

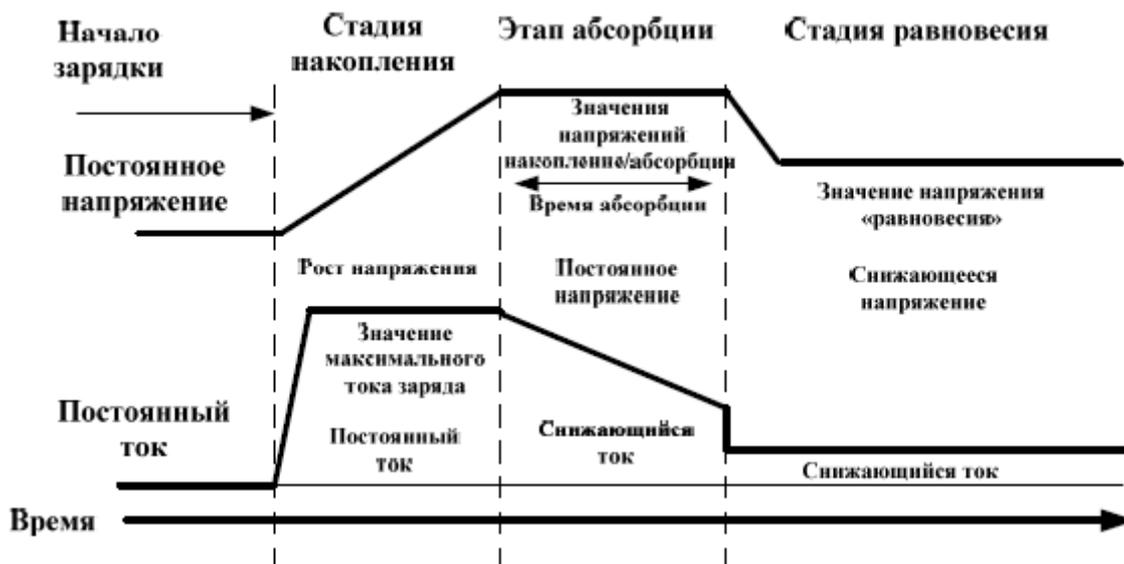


Рисунок 14- Стадии заряда аккумуляторов

1. Главный заряд – этап накопления. Заряд проводится полным током солнечных модулей.

2. Этап насыщения или стадия абсорбции.

При наборе напряжения аккумуляторного накопителя определенного уровня, блок управления начинает поддерживать стабильное напряжение из-за наличия ШИМ тока заряда. Это позволяет исключить перегрев и выделение пузырьков газа в аккумуляторах. Зарядный ток уменьшается с увеличением заряда аккумуляторов.

3. Стадия поддерживающего заряда характерна для максимально заряженной батареи. На этой стадии приложенное напряжение и ток уменьшаются для исключения нагрева и выделения пузырьков газа в батарее, для которой поддерживается стабильный уровень ее заряда.

4. Для аккумуляторов с кислотным электролитом может использоваться еще один этап – выравнивание. Эта стадия предусматривает повторяющийся заряд до выделения пузырьков газа, что способствует стабилизации напряжения на отдельных банках аккумуляторных накопителей, очищения пластин и перемешивания электролита.

С учетом вышерассмотренного, к преимуществам ШИМ контроллеров следует отнести: исключение нагрева до критической температуры и закипания емкостных накопителей, высокий КПД и выравнивание заряда в разных банках емкостных накопителей и в различных аккумуляторах.

Недостатком ШИМ контроллеров является низкий диапазон изменения напряжения генерирующего устройства – фотоэлектрических модулей, что приводит к рассеиванию части энергии.

Проанализируем технологию MPPT (Maximum Power Point Tracking – точка контроля за максимальной мощностью (ТММ)).

MPPT способы управления не используются специально в контроллерах, возможно их применение и в инверторах. Типичный MPPT блок управления постоянно отслеживает ток и напряжение на фотомодулях, перемножает их значения и формирует пару: ток- U при которых энергия

фотоэлектрических модулей, меняющаяся в зависимости от температуры и освещённости, будет наибольшей, соответствующей текущему воздействию лучистой энергии.

Встроенный процессор в свою очередь отслеживает стадию накопления энергии аккумулятора (накопление, фиксация, поддержка, выравнивание) и на основании данной информации определяет величину подаваемого тока. Процессор дополнительно выполняет и другие функции: индикацию состояния на табло, запись и хранение данных и прочие.

Технология MPPT демонстрирует нам наиболее результативную технологию реализации контроллеров, позволяющую повысить КПД использования солнечного излучения на 20-30% по сравнению с классическими ШИМ блоками управления.

Иллюстрация принципа работы MPPT и ШИМ контроллеров фотоэлектростанций показаны на рисунке 15. Для заряда 12 В аккумулятора ШИМ контроллер ограничивает U фотоэлектрического модуля на уровне зарядного – несколько выше 12 В. На данном уровне, в соответствии с рис. 15, зарядная мощность составит 53 Вт (точка 1 на рисунке 15).

MPPT контроллер предоставляет возможность использовать диапазон U фотомодулей от 12 В до допустимого по характеристике – 17 В (точка 2 на рисунке 15). MPPT блок управления преобразует повышенное U в зарядный I , что обеспечивает уровень зарядной мощности 75 Вт.

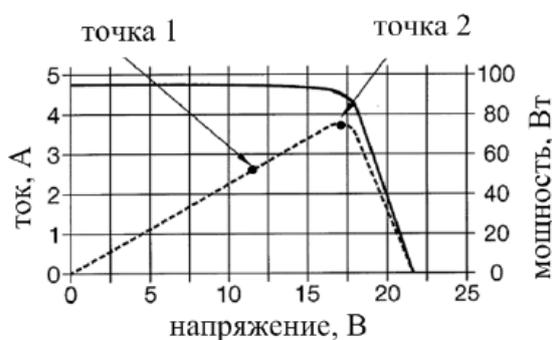


Рисунок 15- Эффективность ШИМ и MPPT солнечных контроллеров

Для реализации данной технологии возможно применение нескольких подходов, которые можно классифицировать на прямые и непрямые.

«Непрямые методы – основаны на периодическом отслеживании точки оптимальной мощности с помощью простых измерений различных параметров.

Прямые методы – методы, включающие в себя прямые измерения тока, напряжения или мощности и имеют более точные и быстрые результаты, чем у непрямых методов. К наиболее известным из них относятся:

- алгоритм постоянного напряжения (тока) (Constant Voltage (current) method);
- алгоритм формирования напряжения, составляющего определенную долю от напряжения холостого хода (Fractional Open Circuit Voltage);
- алгоритм случайных возмущений (Perturband Observe Method);
- алгоритм дополненной проводимости (Incremental Conductance Method)» [5].

Рассмотрим подробнее озвученные алгоритмы.

Первый из них алгоритм неизменного напряжения (тока).

Этот метод основан на корректировке рабочего U солнечного модуля (PV) по сезонным алгоритмам. Обычно повышенные напряжения MPP предвидятся в течение низких температур воздуха по сравнению с летом, при том же уровне солнечного излучения за счет температур (рисунок 16).

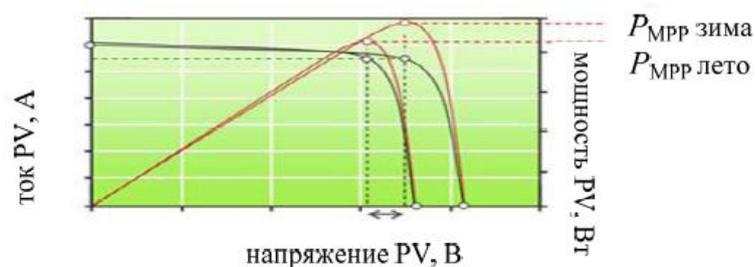


Рисунок 16- Принцип алгоритма постоянного напряжения

Представленный метод не выделяется высокой точностью. Безошибочность возрастает, если воплощение метода происходит с учетом минимальных изменений освещенности в конкретный день, что приводит к разработке рабочего алгоритма.

Алгоритм с использованием напряжения, имеющего определенную долю от напряжения холостого хода. Основное допущение этого метода заключается в том, что разница напряжения точки наибольшей мощности U_{MPP} к напряжению холостого хода U_{xx} практически постоянно:

$$U_{MPP}/U_{xx} \cong k < 1, \quad (1)$$

где k – коэффициент соответствия между напряжением без нагрузки и напряжением максимальной нагрузки (см. рисунок 17).

Метод реализуется прохождением следующих шагов:

- фиксация напряжения без нагрузки массива фотоэлементов (при изоляции от МРРТ);
- вычисление точки наибольшей мощности (ТММ) и коэффициента пропорциональности;
- задание напряжения в контроллере МРРТ, соответствующего коэффициенту пропорциональности.

Данный алгоритм может повторяться множество раз, так как точка ТММ зависит от погодных условий. Как правило, величина данного коэффициента k варьируется в диапазоне 0,73-0,80. Видно, что отслеживание ТММ довольно сложный процесс из-за неопределенности с выбором коэффициента. Любое измерение сопровождается утечкой энергии.

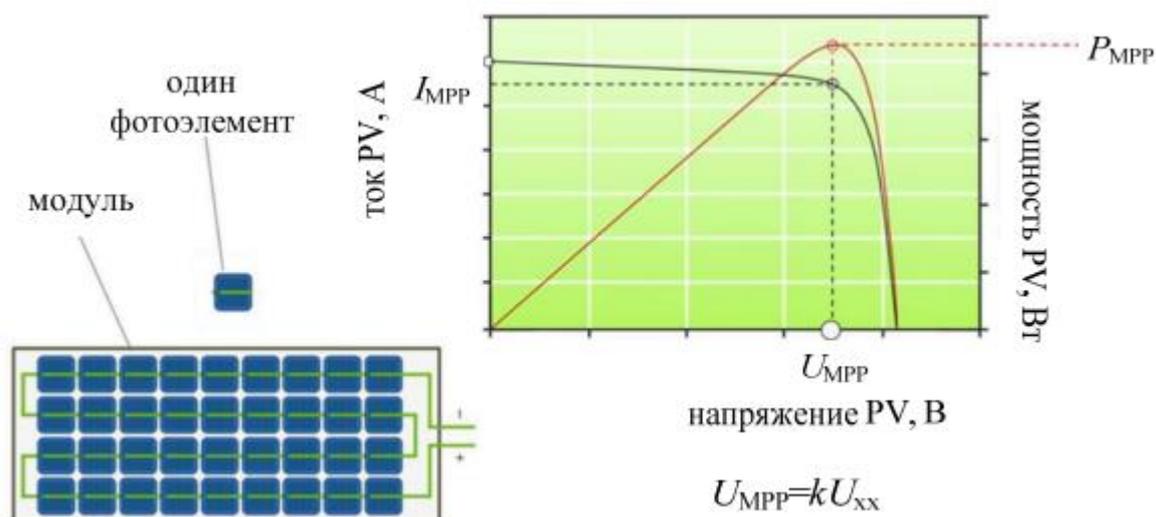


Рисунок 17- Принцип алгоритмизации формирования напряжения, соответствующего напряжению холостого хода фотоэлемента

Небольшое изменение данного метода возможно выполнить измерением показателей одного фотоэлемента (pilot cell), который в полной мере соответствует всем другим солнечным панелям входящим в электростанцию, что упрощает определение коэффициента пропорциональности.

Следующий алгоритм - случайные возмущения.

Такой алгоритм осуществляется следующим образом. «Предположим, что рабочая точка массива солнечных батарей находится в точке А, которая не соответствует точке максимальной мощности (см. рис. 18). В алгоритме случайных возмущений рабочее напряжение массива солнечных батарей увеличивается на небольшое значение. Затем измеряется изменение мощности, отбираемой преобразователем от солнечной батареи. Если изменение мощности положительное, тогда изменения напряжения в том же направлении будут сдвигать рабочую точку ближе к ТММ, в данном случае к точке В (см. рисунок 18). Как только изменение напряжения приводит к снижению мощности (точка С), система начинает изменять его в противоположном направлении. Таким образом, при достижении точки

максимальной мощности (P_{MPP}) система приходит в состояние динамического равновесия (отношение изменения мощности и напряжения равно нулю)» [6].

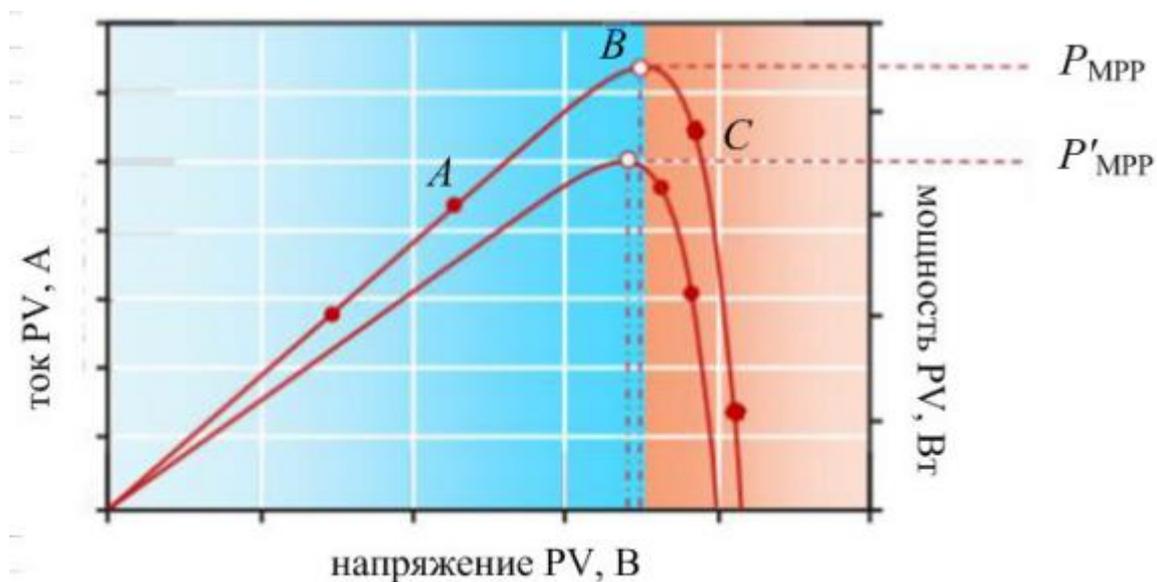


Рисунок 18- Принцип алгоритма случайных возмущений

Преимущество такого управления в его легкости реализации среди прямых алгоритмов. Однако, алгоритм случайных возмущений имеет несколько недостатков, которые являются источником снижения его эффективности.

При незначительных уровнях освещения U-амперная характеристика выравнивается, что приводит к сложностям при расчете точки максимально отдаваемой энергии, так как перемены в мощности оказываются малы в сопоставлении с изменением U. Другой недостаток способа случайных возмущений, в том, что он не может однозначно определить момент прохождения регулятором ТММ. Для метода случайных воздействий характерны колебания характерной точки, вокруг значения максимальной мощности, что приводит к уменьшению эффективности алгоритма. Вдобавок работа алгоритма во время тестирования в некоторых режимах служит

источником ошибочных результатов. Такое поведение имеет возможность наблюдать в структуре случайных возмущений при резком изменении величины освещенности (нижняя линия на рисунке 18). Эта ошибка будет возникать в переходном режиме, когда изменения выходных данных вследствие изменения уровня излучения превосходят изменения параметров, обусловленные работой алгоритма (итерации поиска ТММ).

Алгоритм случайных воздействий также может базироваться на изменении параметров напряжения на неизменные величины или на переменные.

Алгоритм дополненной проводимости (Incremental Conductance Method).

«В методе дополнительной проводимости измеряются постепенные изменения тока и напряжения массива для предсказания эффекта изменения напряжения. Метод использует приращение проводимости dI/dV массива фотоэлементов для вычисления знака изменения мощности по отношению к напряжению dP/dV .

Метод приращения проводимости вычисляет точку максимальной мощности, сравнивая приращение проводимости dI/dV с проводимостью массива I/V и точка, в которой они равны, и есть точка максимальной мощности. Затем данное равновесие поддерживается до момента изменения условий эксплуатации (см. рисунок 19, 20)» [7].

Вывод алгоритма исходит из формулы:

$$dP/dV=d(I \cdot V)/dV=>dP/dV=I+V \cdot d(I)/dV \quad (2)$$

Мгновенное напряжение и ток – это наблюдаемые параметры, при этом напряжение еще и контролируемая величина. U_{ref} – это напряжение на солнечных модулях, установленное МРРТ устройством. В большинстве случаев, это последняя величина напряжения точки пиковой мощности.

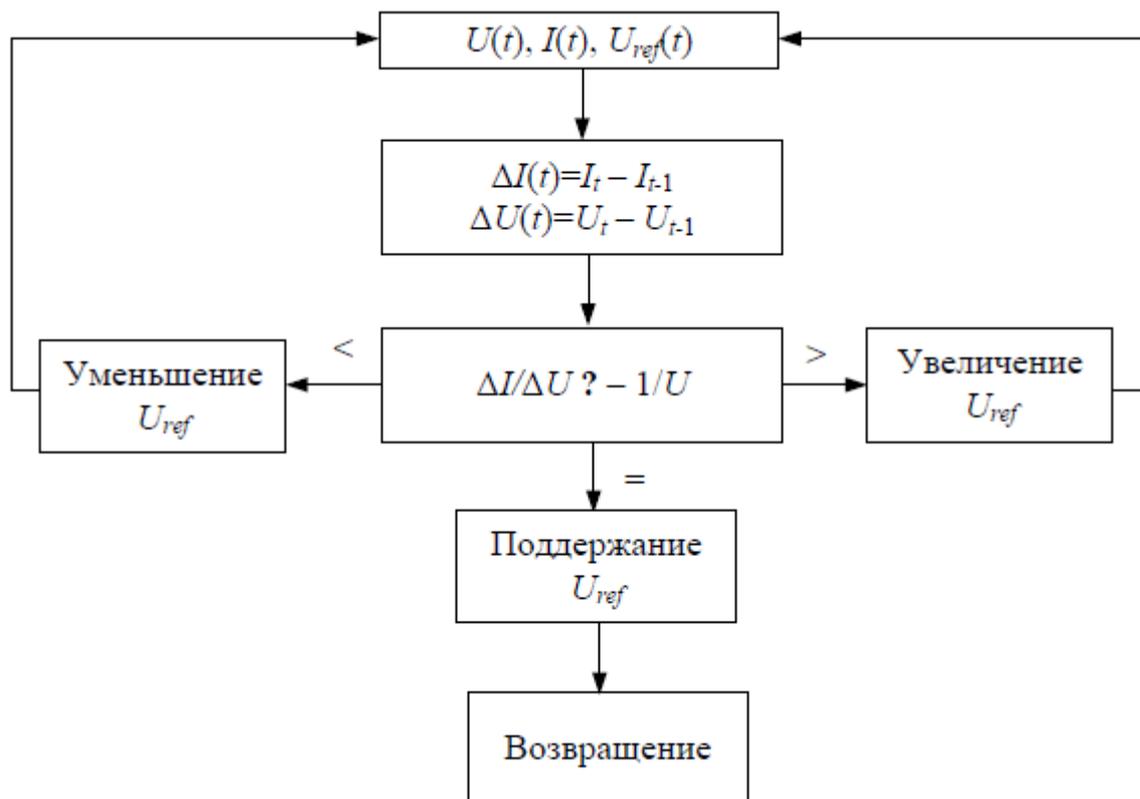


Рисунок 19- Алгоритм дополненной проводимости

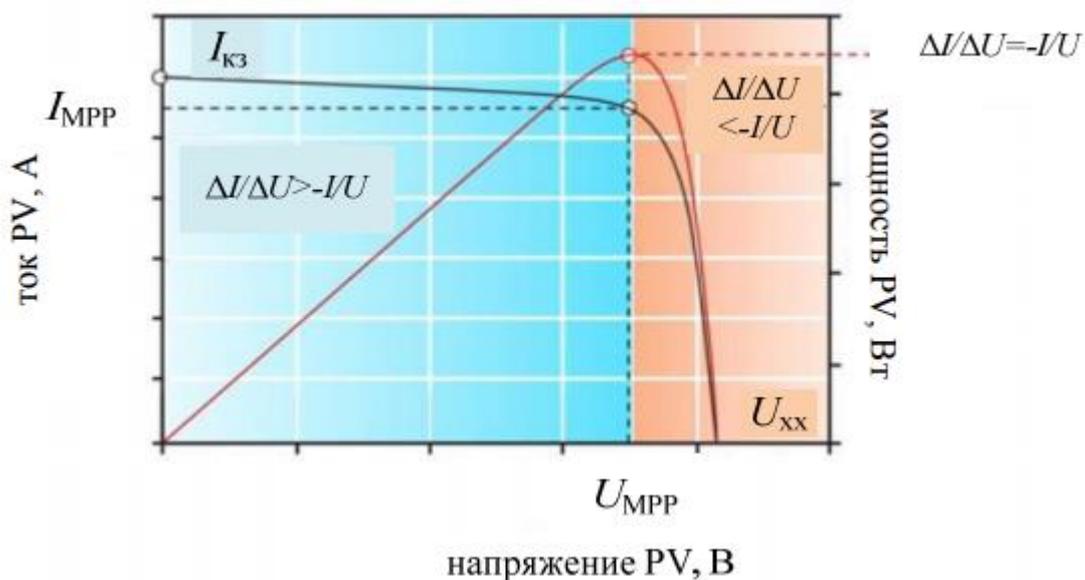


Рисунок 20- Принцип работы алгоритма дополненной проводимости

Данный способ является одним из самых эффективных. При расчете ТММ последовательности действий не зависит в области этого отрезка, при устойчивом положении, в отличие от алгоритма случайных воздействий. Кроме того, минимальные интервалы отбора параметров делают его почти невосприимчивым к переменным условиям освещения. Тем не менее, при очень быстро преобразующихся условиях или небольшом затенении, алгоритм дополненной проводимости может проявить себя не очень эффективным. Главным недостатком этого способа является сложность в аппаратной реализации. Приходится не только регистрировать параметры энергетических потоков, но также определять их мгновенные и усредненные значения проводимости.

«Основными достоинствами солнечных контроллеров MPPT типа являются следующие особенности:

1) повышается эффективность использования не только аккумуляторной батареи, но и фотоэлектрических модулей за счет возможностей использования слабой инсоляции;

2) увеличивается мощность, снимаемая с фотоэлектрических модулей, за счет увеличения их суммарного напряжения и преобразования его в зарядный ток с помощью DC\DC преобразователя;

3) появляется возможность заряда аккумуляторов при низкой освещенности;

4) более высокое входное напряжение контроллера позволяет уменьшить сечение кабелей и увеличить расстояние до фотоэлектрических модулей» [8]

Следует отметить, современные солнечные инверторы частично обладают функциями MPPT контроллеров. Например, солнечный инвертор немецкой компании SMASUNNY ISLAND, автономный инвертор SANNY BOY и др.

Структурная схема трёхфазного сетевого преобразователя с MPPT алгоритмами показана на рисунке 21. MPPT регистраторы отслеживают

точку пиковой мощности солнечной панели, затем стоит преобразователь, который изменяет род тока на противоположный, синхронизированный с частотой электросети. С выхода преобразователя электроэнергия направляется в сеть.

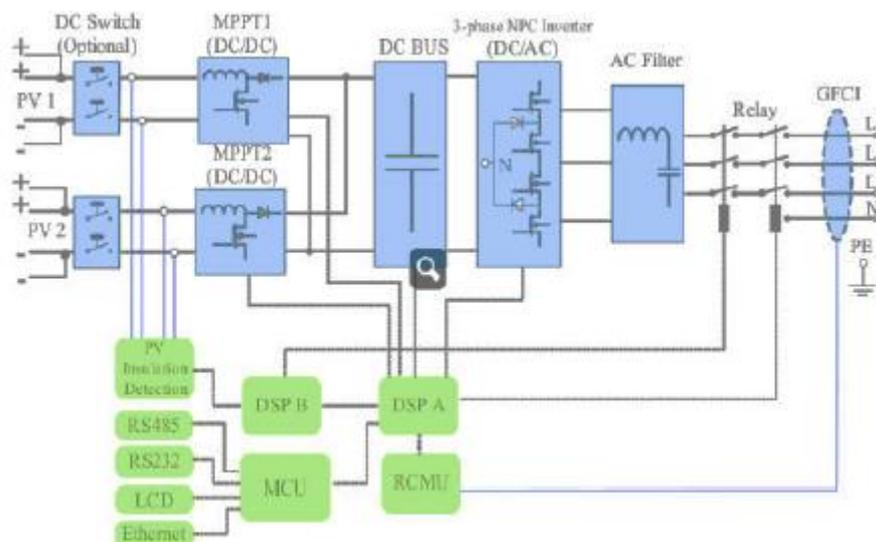


Рисунок 21- Топология сетевого инвертора с MPPT трекерами

Устройства ШИМ управления обычно применяются в системах мощностью до 2-3 кВт с аккумуляторным накопителем небольшой емкости. MPPT контроллеры рекомендуются применять в более мощных автономных электростанциях. Доступные к приобретению образцы контроллеров солнечных электростанций рассчитаны на входное напряжение в интервале от 74 до 200 В и ток до 60-80 А. Это позволяет запитать энергией на один контроллер фотомодули мощностью до 4 кВт с системным напряжением 48 В.

Вопросы оптимизации ветрогенератора.

Мощность генератора зависит от мощности потока ветра и скорости вращения турбины. По теории работы электрогенератора известно, что каждой величине скорости ветра соответствует определенная частота оборотов ветротурбины, причем при данной частоте генератор развивает предельную мощность (см. рисунок 11).

Для снятия с генератора максимальной мощности от ветроэлектростанции для различных скоростей ветра требуется регулировать обороты вала. Регулировка оборотов вала ветрогенератора обычно производится изменением его внешней нагрузки. В автономных системах для нагрузки генератора применяются аккумуляторные батареи и балластные нагрузки. В сетевых ветроэлектростанциях появляются возможности регулирования количества энергии, отдаваемой во внешнюю электрическую сеть.

Заряд емкостного накопителя энергии и обеспечение режима эффективной работы производится с помощью блоков-преобразователей энергии ветра. Введение в энергосистему контроллера заряда емкостных накопителей показано на рисунке 22.

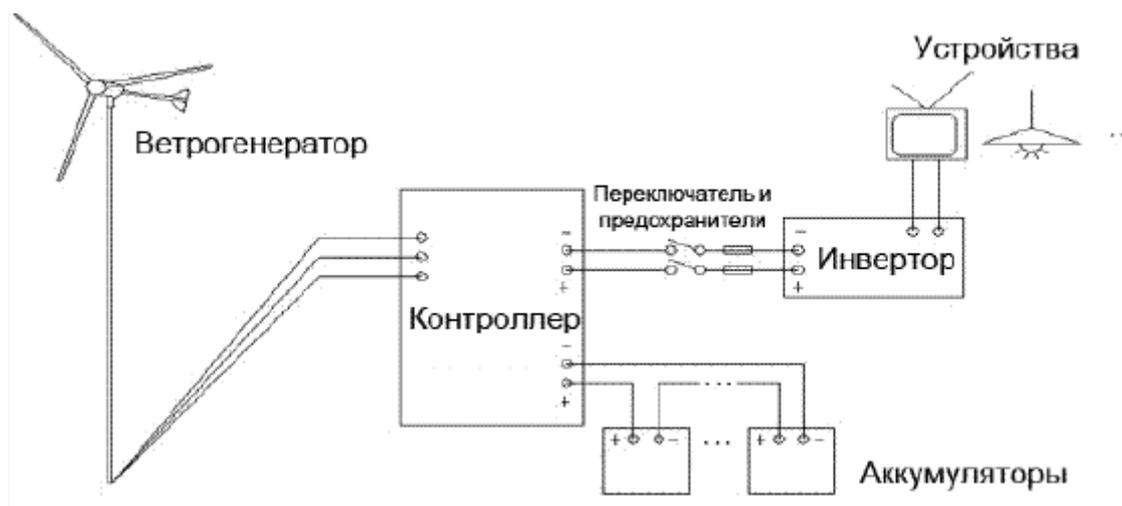


Рисунок 22- Функциональная схема автономной электростанции

Контроллер является главным связующим звеном между различными структурными элементами, входящими в автономные источники энергии и выполняет следующие функции:

«1. Преобразование трехфазного переменного тока ветрогенератора в постоянное.

2. Регулировка величины зарядного тока в зависимости от степени заряженности аккумулятора.

3. Обеспечение разгона ротора на холостом ходу при слабых ветрах.

4. Отключение аккумуляторов от ветрогенератора при полном заряде.

5. Подключение балластной нагрузки для защиты аккумуляторных батарей и уменьшении частоты вращения ветрогенератора при больших скоростях ветра.

6. Мониторинг параметров рабочего режима ветроэлектростанции. Контроллер ветроэлектростанции с MPPT технологией, кроме отмеченных функций, обеспечивает работу ветрогенератора в точке максимальной мощности для каждой скорости ветра» [9].

Если необходимо постоянно получать максимальную энергию от ветрогенератора требуется поддерживать оптимальную соответствующую фиксированному значению скорости потока воздуха частоту вращения вала ротора, соответствующую точке его максимальной мощности.

Применяются два типа методов отслеживания точки пиковой мощности:

- алгоритмы, базирующиеся на использовании табличных параметров и величин ветрогенераторов;

- методы, не требующие наличия известных характеристик конкретного ветрогенератора.

В качестве «алгоритмов поиска точки пиковой мощности ветрогенератора широко распространены следующие:

- метод обеспечения режима работы ветрогенератора с оптимальной величиной быстроходности;

- метод на основе сравнения известной зависимости максимальной мощности ветротурбины от частоты вращения с фактическим значением генерируемой мощности;

- метод поиска точки максимума мощности без априорной информации о параметрах ветрогенератора» [10].

Первый метод применяет регулирование оборотов вала ветрогенератора для обеспечения оптимальной быстроходности за счет регулирования величины подключаемой к генератору нагрузки. Данный метод требует контроля текущей скорости потока воздуха и оборотов вала ветрогенератора. Метод подразумевает знания характеристик электрической машины, в частности ее оптимальной быстроходности. Функциональная схема реализации этого метода приведена на рисунке 23.

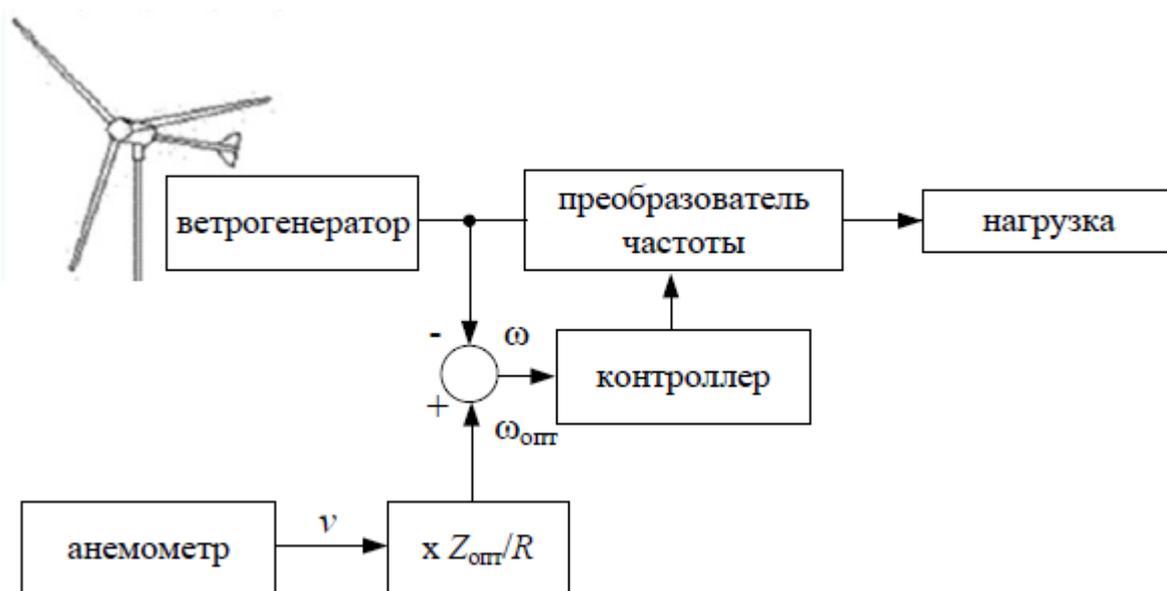


Рисунок 23- Структура реализации метода обеспечения оптимальной быстроходности вала генератора

Второй метод контроля точки максимальной токоотдачи ветрогенератора требует наличия зависимости максимальной токоотдачи ветротурбины от скорости ее вращения. Эта зависимость хранится в памяти микроконтроллера. Способ основан на контроле частоты вращения вала генератора, вычислении оптимальной токоотдачи для текущей частоты вращения турбины и сравнении данных с текущим значением выходной величины тока. Схема реализации этого метода показана на рисунке 24.

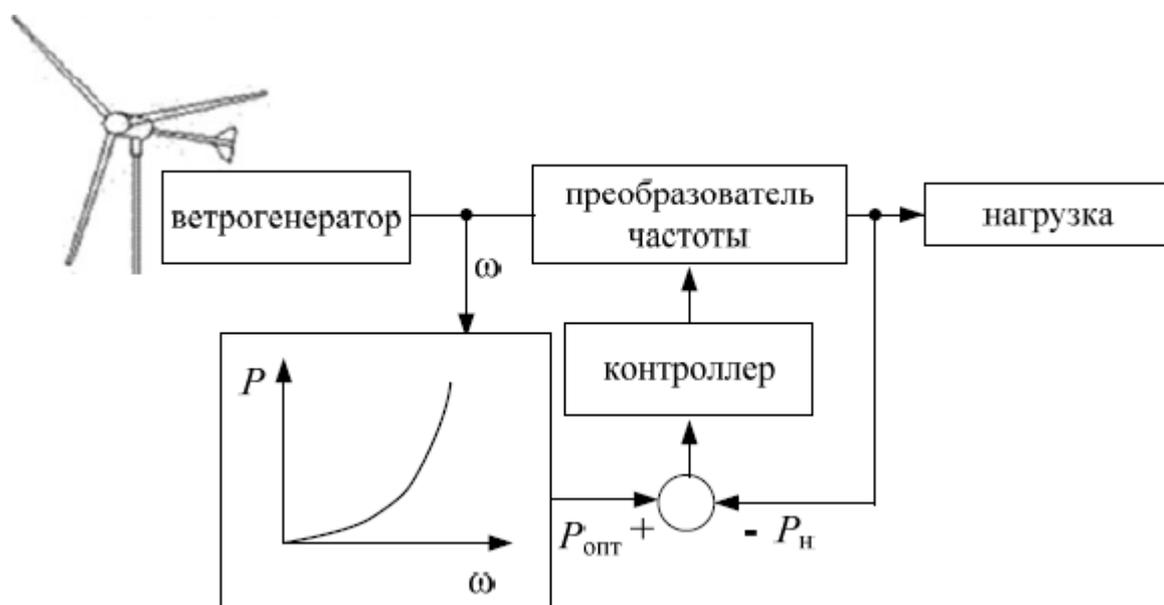


Рисунок 24- Схема реализации способа с использованием обратной связи по токоотдаче

Перечисленные методы основаны на известных рабочих параметрах ветротурбины. Обычно компании не приводит в полном объеме технические данные. Остается приобретать их самостоятельно за счет экспериментальных исследований и моделирования, что часто трудоемко или экономически дорого.

Третий способ обеспечения максимальной токоотдачи ветрогенератора лишен названных недостатков. Принцип определения точки максимальной токоотдачи иллюстрируется рисунке 25.

При значении функции $dP/d\omega=0$ величина мощности находится в точке максимума. В случае отрицательного значения изменения мощности P по частоте вращения искомая точка на критериальной характеристике смещена вправо от точки экстремума. Для возврата в режим максимальной токоотдачи необходимо уменьшить обороты вала ветрогенератора. В случае положительного значения изменения мощности для возврата в режим максимальной токоотдачи следует увеличить обороты вала ветрогенератора.

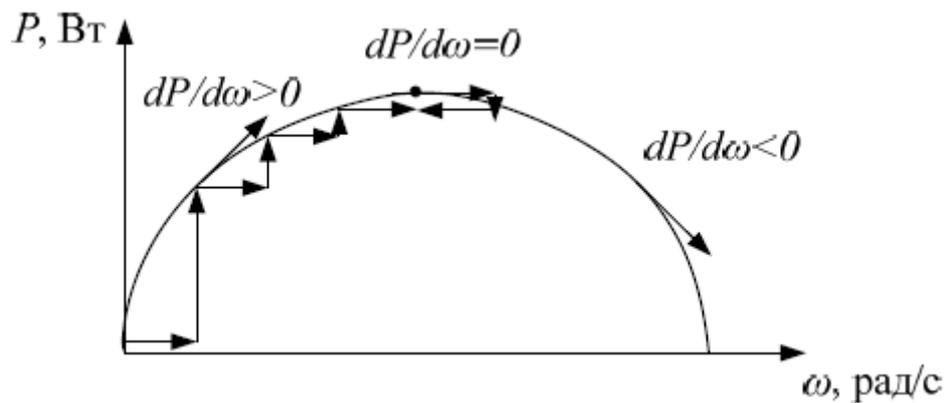


Рисунок 25- Алгоритм поиска максимума мощности

Не считая поиска точки экстремума мощности, контроллеры управления ветрогенераторами с использованием интеллектуальных технологий предоставляют возможность расширить диапазон применения энергии ветра. В частности, имеются блоки управления, обеспечивающие работу ветроэлектростанции при низких оборотах турбины.

Для этого блок управления фиксирует «частоту вала включения» и «частоту вала выключения». При данных оборотах начинается и заканчивается отбор мощности от ветроэлектростанции.

Задание рабочего диапазона оборотов ветрогенератора создает ситуацию, при которой в случае снижения сила ветра ниже рабочего диапазона он отключается от потребителей.

При отсутствии нагрузки ветротурбина, и при слабом потоке ветра, набирает рабочую частоту вращения в соответствии с расчётными профилем и углом атаки лопастей (см. рисунок 11). После увеличении рабочих оборотов вала, контроллер подключает обмотку возбуждения к аккумуляторной батарее и подает в нее питание. Ветрогенератор вновь начинает замедляться и контроллером вновь разъединяет его с нагрузкой. Используя данный алгоритм, при слабом потоке ветра, энергия забирается в повторяющиеся отрезки времени, но в сумме количество отданной генератором энергии больше, чем бы выработал ветрогенератор с обычным

блоком управления, так как токоотдача присутствует и при оборотах вращения ветрогенератора, соответствующих оптимальным.

Как и в случае с фотоэлектростанций, инверторы для ветростанций могут реализовать часть алгоритмов МРРТ, обеспечивающие пик выработки электроэнергии с текущей скорости воздушного потока.

Таким образом, повышение производства электроэнергии солнечными и ветроэлектрическими станциями до максимально возможных значений, соответствующей энергетическому пределу первичного энергоносителя, реализуется с помощью «умных» контроллеров заряда блока накопителей энергии и интеллектуальных контроллеров. Наибольшее распространение в указанных элементах альтернативных энергоустановок, на сегодняшний день, приобретают МРРТ технологии.

2.2 Оптимизация режимов работы накопителей электроэнергии

Наиболее популярны в настоящее время аккумуляторы со свинцовыми электродами и кислотным электролитом. У них меньше приведенная стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, по сравнению с аккумуляторами, работающих по другим процессам. Они имеют высокий КПД и эксплуатируются при различных температурах, в том числе отрицательных. Для сравнения, эффективность свинцово-кислотного АКБ лежит в пределах 75-80%, а эффективность АКБ с щелочным электролитом не более 50-60%. Общий вид некоторых моделей аккумуляторных батарей показан на рисунке 30. Наиболее часто в системах бесперебойного и автономного электроснабжения используются три основных вида аккумуляторных технологий: AGM, GEL и Flooded.

GEL-технология Gelled Electrolite появилась в середине XX века. К электролиту добавляется SiO₂, и через некоторое время электролит превращается из жидкого в желеобразный. В этой массе имеется множество микроотверстий, которые заполнены электролитом. Такая консистенция

позволяет работать GEL аккумулятору с любым углом наклона и исключает вытекание электролита при опрокидывании. Аккумулятор GEL технологии не требует проверок и регулировок в течении всего срока службы.

AGM-технология Absorptive Glass Mat разработана на 20 лет позже. Вместо вязкого, с консистенцией геля электролита, в них используется стекломат, который пропитывают электролитом. Поры стекломатов электролит заполняет не до конца. В оставшемся объеме выполняется рекомбинация газов.

«Flooded-аккумуляторы с жидким электролитом (заливные) по прежнему имеют широкое применение. Будучи снабжены рециркуляционными клапанами, они переходят в класс малообслуживаемых АКБ. Такие клапаны не допускают выделения газов, а проверять уровень электролита нужно лишь раз в год. Это снимает ограничения на размещение Flooded-аккумуляторов внутри помещений. Аккумуляторы открытого типа более выносливы по сравнению с необслуживаемыми аккумуляторами, удельная стоимость Ампер-часа в них ниже, и они лучше поддаются балансировке» [11].



Рисунок 30 - Разновидности аккумуляторов

Повышение емкости блока АКБ связано с тем, что отдельные аккумуляторы объединяются способами параллельного, последовательного и параллельно-последовательного объединения (см. рисунок 31). Для последовательного подключения аккумуляторов необходимо применять аккумуляторы одного типоразмера. При этом общая емкость равна емкости одного аккумулятора, а напряжение равно сумме напряжений отдельных АКБ.

При параллельном подключении АКБ, напротив, суммируются емкости, и общая емкость увеличивается, а напряжение блока соответствует исходному напряжению одного аккумулятора. Параллельно-последовательная коммутация ведет к увеличению обоих параметров блока АКБ. При создании емкостного накопителя энергии необходимо учитывать, что аккумуляторы выпущенные в разное время могут незначительно отличаться друг от друга и то, что при хранении происходит их саморазряд.

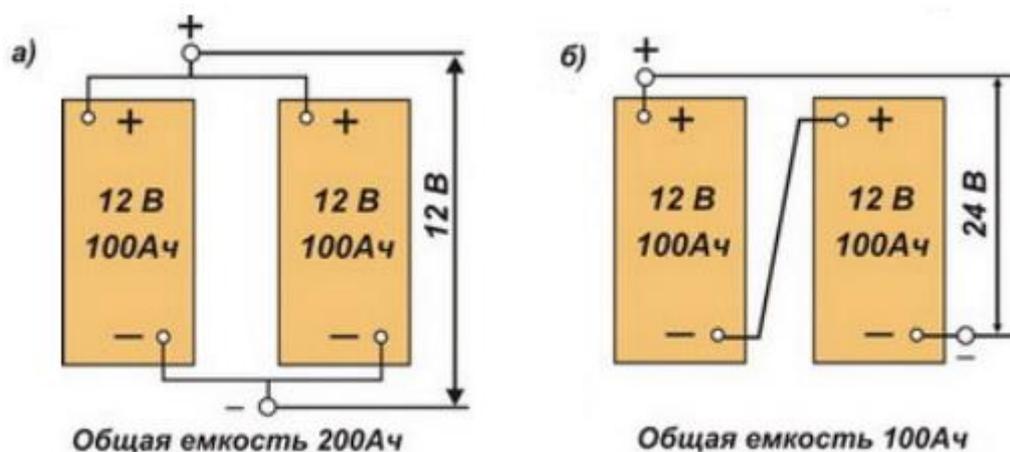


Рисунок 31 - Способы соединения аккумуляторов : а) параллельное; б) последовательное

По прошествии времени АКБ, объединенные последовательно, и в большей степени последовательно-параллельно соединенные батареи, предрасположены к разбалансировке. Это приводит к тому, что суммарное

напряжение последовательных АКБ совпадает с нормой для зарядного устройства, но в самой цепочке отдельные уровни напряжений одиночных аккумуляторов сильно отличаются от нормы. Последствием является то, что часть аккумуляторов перезаряжается, а другая часть недозаряжается. Это значительно уменьшает их срок службы. Специальные устройства заряда позволяют свести к минимуму это отрицательное явление. В исключительных случаях необходимо 1-2 раза в год проводить заряд каждого аккумулятора в отдельности. Для последовательно-параллельного соединения аккумуляторов необходимо делать перемычки между средними точками, что способствует самовыравниванию заряда. Для сбалансированного потребления энергии от аккумуляторов батареи плюсовой вывод нужно "брать" с ближайшего аккумулятора, а минусовой вывод с диагонально расположенного.

Как известно, рабочая емкость АКБ зависит от тока разряда (см. рисунок 32).

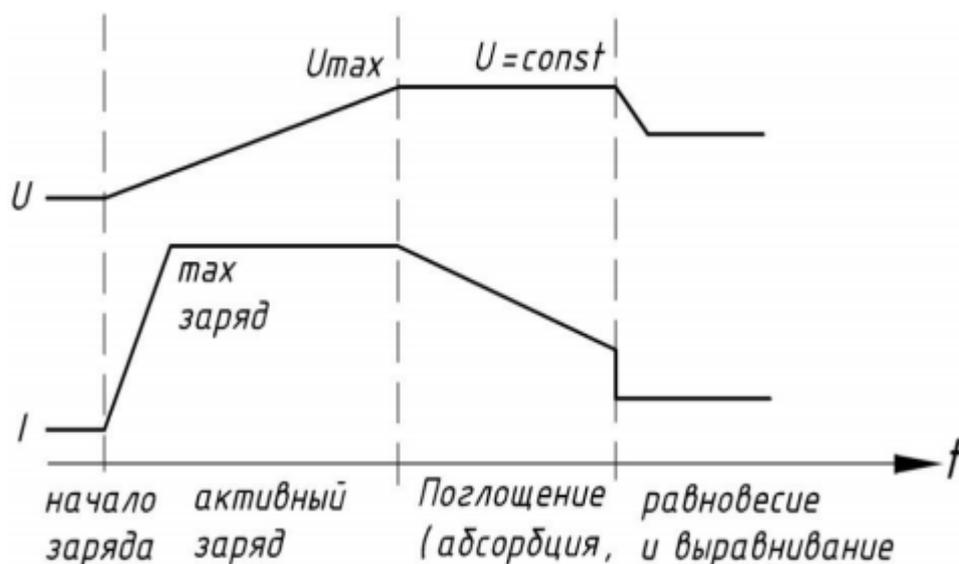


Рисунок 32 – Режимы заряда-разряда АКБ с помощью контроллера

Даже при незначительном начальном токе разряда может происходить довольно существенное уменьшение напряжения. Срок эксплуатации

напрямую зависит от количества циклов «заряд-разряд» и уменьшается с глубиной разряда и ростом температуры. АКБ необходимо защищать от большого и продолжительного перезаряда и недопускать глубокого разряда (ниже 30%). В случае, если АКБ полностью разряжен, то возникает сульфат в кристаллическом виде. Сравнение типов АКБ по ресурсу показан в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение типов АКБ по ресурсу

Тип аккумулятора	Ресурс, количество циклов «зарядразряд»
Стартерные свинцово-кислотные АКБ	до 200
Аккумуляторы AGM	250 — 400
Гелевые АКБ	350
Панцирные АКБ	от 900 до 1500

«Срок лужбы аккумуляторов в составе систем автономного электропитания напрямую зависит от количества и характера циклов «заряд – разряд» в процессе эксплуатации. Аккумуляторы работают в циклическом режиме, при этом в определенные периоды возможны глубокий разряд и недозаряд. При переходе из режима заряда в режим разряда понижается напряжение на АКБ.

Особенностью АКБ с гелевым электролитом в том, что при отрицательных температурах резко возрастает внутреннее сопротивление, что затрудняет их заряд. Согласно стандарту на свинцово-кислотные стационарные батареи, аккумулятор не рекомендуется далее эксплуатировать, если его емкость уменьшилась на 20%, т. е. стала 80% от исходного значения. В соответствии с данными рекомендациями, при проведении эксперимента глубина разряда АКБ была ограничена на уровне

30% путем настройки и конфигурирования параметров используемого контроллера заряда» [12].

Применение специализированных контроллеров заряда блока аккумуляторных батарей автономных источников энергии позволяет значительно продлить срок эксплуатации аккумуляторов. Рекомендуемый алгоритм работы такого контроллера показан на рисунке 33.

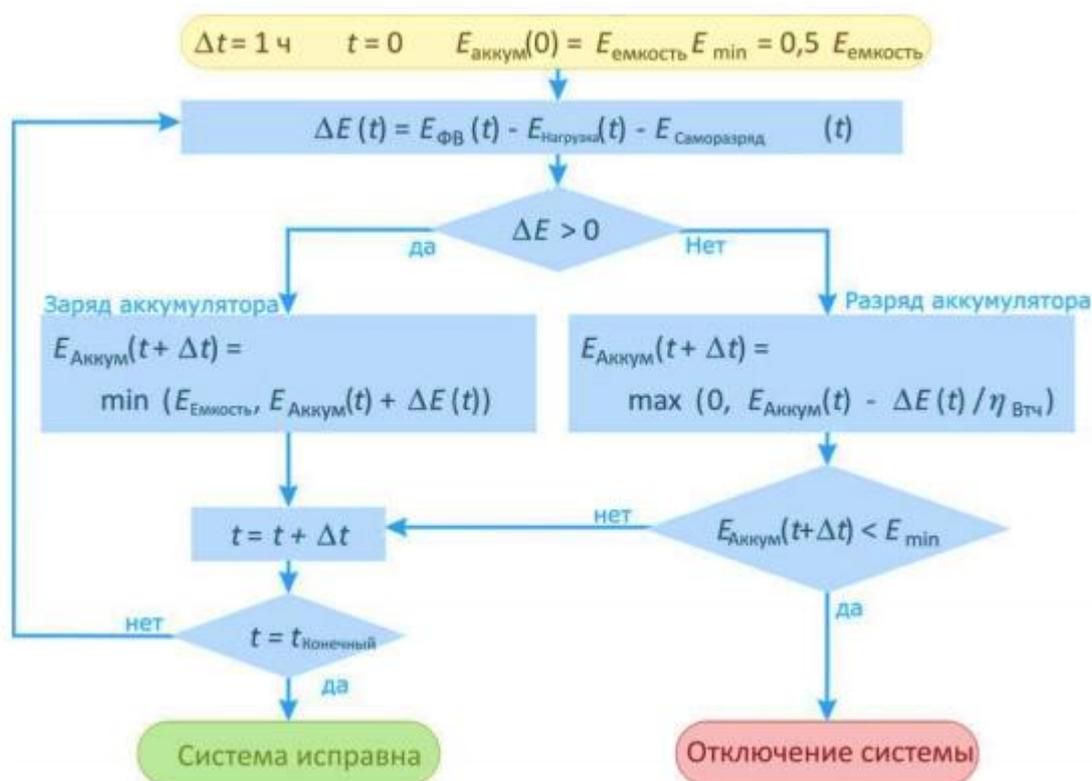
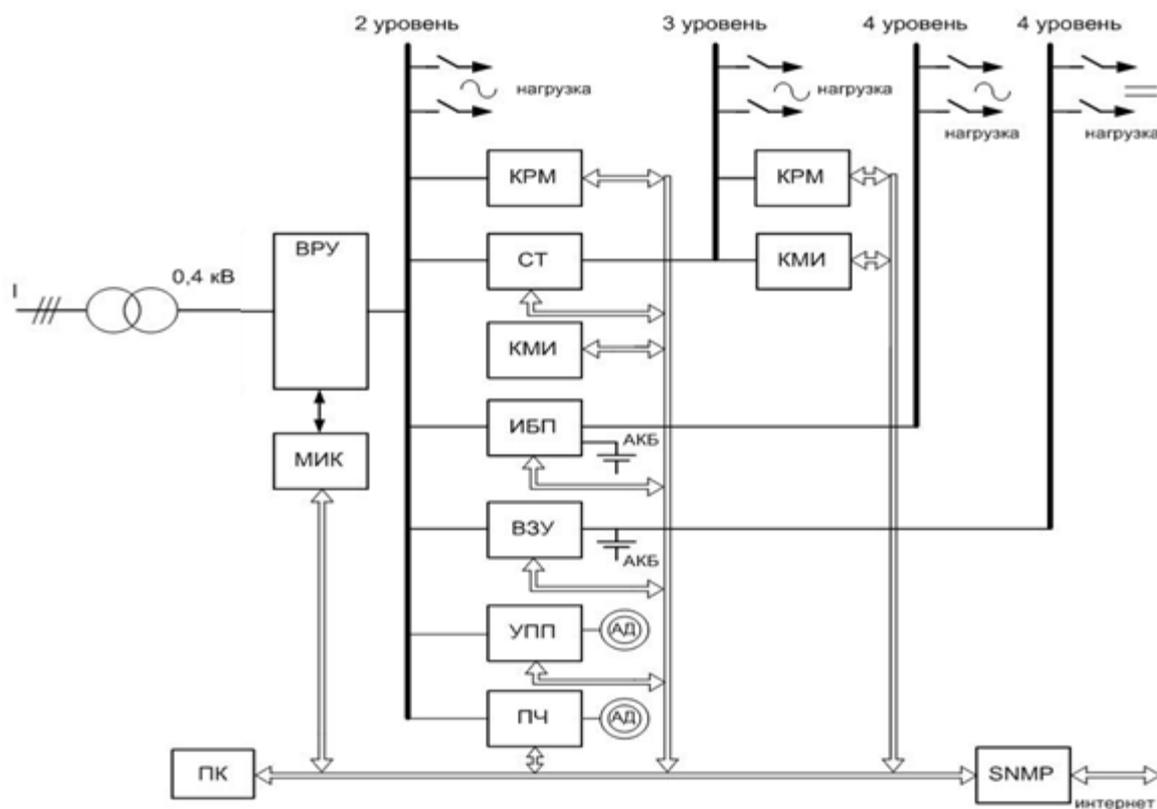


Рисунок 33 – Алгоритм работы контроллера заряда-разряда АКБ

2.3 Способы повышения качества электроэнергии, вырабатываемой ветровыми и солнечными электростанциями за счет технических средств

Рассмотрим концепцию интеллектуальной системы электроснабжения автономных источников энергии (ИСЭЛ АИЭ) (см. рисунок 34).



«ТП – трансформаторная подстанция, ДГУ - дизель-генераторная установка, АПУ – автоматическая панель управления, АВР – установка автоматического ввода резерва, ВРУ – вводно-распределительное устройство, МИК – многофункциональный измерительный контроллер, СТ – стабилизатор напряжения, ИБП – источник бесперебойного питания, АКБ – аккумуляторные батареи, ВЗУ – выпрямительно-зарядное устройство, КРМ – компенсатор реактивной мощности, КМИ – компенсатор мощности искажения, УПП – устройство плавного пуска, ПЧ – преобразователь частоты, ПК – персональный компьютер» [13]

Рисунок 34 – Структурная схема ИСЭЛ АИЭ

ИСЭЛ АИЭ многоуровневую структуру. К шине второго уровня подключено вводно-распределительное устройство (ВРУ) которое комплектуется всем необходимым электротехническим оборудованием для защиты электрической сети второго уровня от негативных влияний внешних электрических сетей. Самое отрицательное воздействие оказывает сетевое перенапряжение, высокочастотные гармоники и гармонический шум. Также

на втором уровне реализуются основные защитные функции (от КЗ, перегрузок, перенапряжения) и компенсация реактивной мощности.

Основным компонентом по важности выполняемой функции на шине третьего уровня является стабилизатор напряжения (СТ). Как следует из его названия, главная его задача – обеспечение высокого качества напряжения при изменении его входного уровня.

На четвертом уровне расположены два базовых устройства:

- источник бесперебойного питания (ИБП) переменного тока, поддерживающий непрерывность подачи одно и трех фазного напряжения как на нагрузку, так и на собственные нужды, с низким коэффициентом несинусоидальности;

- выпрямительно-зарядное устройство, преобразующее поступающий от ИБП переменный ток в постоянный, требующийся в первую очередь для собственных нужд ИСЭЛ АИЭ, но и выдаваемый на нагрузку постоянного тока.

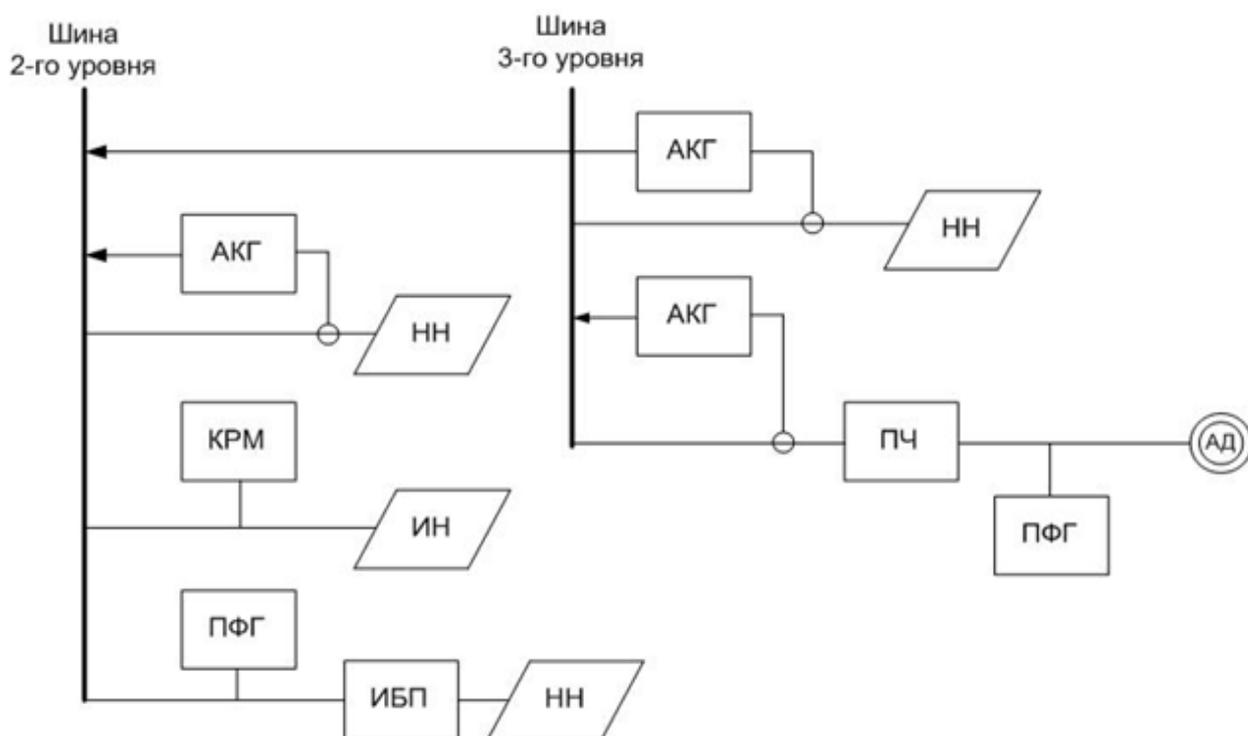
«В структуре ИСЭЛ принят каскадно-многоуровневый способ включения компенсаторов реактивной мощности (КРМ) и компенсаторов мощности искажения (КМИ) на шинах второго и третьего уровней (см. рисунок 35). КРМ подключаются непосредственно как на входе питания мощных индуктивных (ИН), например асинхронных электродвигателей, так и на общей шине соответствующего уровня. КМИ подключаются на входе нелинейных нагрузок (НН) типа выпрямителей, ИБП, преобразователей частоты (ПЧ), импульсных источников питания и т.д. для компенсации высших гармоник тока, генерируемых нелинейной нагрузкой в общую шину» [14].

Рассмотрим более подробно основные структурные элементы ИСЭЛ АИЭ.

ВРУ содержит воздушные автоматические выключатели, выключатели нагрузки, распределительные шины, средства АВР и другую

коммутационную аппаратуру. Для защиты АИЭ от негативного сетевого воздействия в ВРУ имеются следующие элементы:

- «– сетевые автоматические выключатели;
- сетевые фильтры высоко частотных шумов;
- фильтры высших гармоник (250, 350, 550 Гц);
- варисторные блоки устройств защиты от перенапряжений;
- устройства дифференциальной защиты от токов утечки;
- быстродействующие предохранители – плавкие вставки;
- счетчики учета электроэнергии» [15].



«АКГ – активный кондиционер гармоник, КРМ – компенсатор реактивной мощности, НН – нелинейная нагрузка, ИН – индуктивная нагрузка, ИБП – источник бесперебойного питания, ПФГ – пассивный фильтр гармоник, ПЧ – преобразователь частоты» [14]

Рисунок 35 - Каскадно-многоуровневый способ подключения КРМ и КМИ

Для расширения функциональных возможностей ИСЭЛ АИЭ дополнительно в ВРУ могут быть установлено высокотехнологичное оборудование для повышения устойчивости АИЭ к возможным неисправностям и аварийным режимам работы:

- многофункциональный измерительный контроллер (МИК), занимающийся сбором информации о техническом состоянии устройств, установленных на втором уровне ИСЭЛ АИЭ: электрические параметры (I , U , P , Q , f , $\cos\varphi$) и температурный режим эксплуатации. Собранная информация отображается на собственном дисплее прибора и передается по специальному протоколу в персональный компьютер, подавая ее на вход устройств, в ней заинтересованных и в локальную сеть;

- анализатор состояния изоляции кабеля (АСИ), собирающий информацию о дефектах изоляции кабелей, проводов и приборов, установленных в ИСЭЛ АИЭ. Для этого АСИ использует информацию о температуре (в большей степени относится к изоляции приборов и аппаратов) и частичных разрядах (высоковольтные проводящие линии);

- анализатор качества заземления (АКЗ), позволяющий оценить состояние заземления оборудования, установленного в ВРУ. Прибор многофункциональный, оснащен возможностью передачи собранной информации на ПК. Имеет и собственный индикатор. Кроме стандартного измерения сопротивления заземления прибор способен выполнить импульсное измерение удельного сопротивления грунта и некоторые другие измерения.

Так как автономные источники энергии в основном обладают не очень большой мощностью, оборудование таких подстанции стоит дорого, а срок окупания высок, большинство людей, приобретающих данное оборудование готовы бороться за каждую «копейку». В этом может помочь устройство компенсации реактивной мощности, которая присутствует практически в любой электрической сети и несмотря на свой маленький размер позволит экономить. Для применения в ИСЭЛ АИЭ рекомендуется применить хорошо

себя зарекомендовавшие серийно выпускаемые блоки конденсаторных батарей. Они выпускаются на широкий диапазон мощностей от 10 до 1600 квар.

Еще одним серьезным вопросом в малом объеме автономной электрической сети, имеющей подключение к единым энергосетям, а также имеющие в нагрузке индуктивные составляющие и нелинейные нагрузки, является появление высших гармоник тока. Если частота высших гармоник совпадет с основной частотой источника энергии, то в сети возникает мощность искажения. Измененная форма тока (уход от синусоидальности) в свою очередь вызывает искажение напряжения, а вместе они уже отрицательно влияют на работу электротехнического оборудования, в первую очередь содержащего электронику. Появление «лишних» гармоник тока увеличивает его действующее значение, а значит возрастает и тепловое действие тока. Для борьбы с данным нежелательным явлением предназначены приборы в общем имеющие название устройства компенсации мощности искажения (КМИ).

«КМИ могут быть реализованы на основе пассивных LC-фильтров, настроенных на 3-ю гармонику для однофазных нагрузок, или на 5, 7, 11, 13-ю гармоники для трехфазных нагрузок. Возможно использование активных кондиционеров гармоник (АКГ), самонастраивающихся на определенные частоты высших гармоник. Токовый диапазон компенсации высших гармоник АКГ составляет 20 – 120 А» [15].

Так как одной из причин создания автономного источника питания является неудовлетворенность качеством поставляемой электрической энергии, то в ИСЭЛ АИЭ необходимо обязательно ввести стабилизатор напряжения переменного тока и тогда незначительные колебания напряжения, не связанное с аварией в системе будет отрабатываться этим прибором, создавая так называемую шину гарантированного напряжения переменного тока на третьем уровне ИСЭЛ АИЭ [31].

«Различают следующие типы стабилизаторов:

СТС- стабилизатор с подмагничиванием;
СДТ - стабилизатор дискретный тиристорный;
СДП - стабилизатор двойного преобразования;
СТЭМ - стабилизатор электромеханический;

Диапазон мощностей трехфазных стабилизаторов составляет: 10 – 1000 кВА» [16].

Следующим устройством, повышающим и без того уже высокий уровень напряжения на выходе ИСЭЛ АИЭ, является источник бесперебойного питания переменного тока (ИБП). Его целью является создание на четвертом, самом нижнем уровне (или с другой стороны самом близком к конечному потребителю) шины гарантированного напряжения четвертого уровня. К этой шине подключены нагрузки с наивысшим приоритетом к бесперебойности питания, в том числе приборы, которые должны продолжать работать при возникновении нештатной ситуации в системе. Для ИСЭЛ АИЭ рекомендуется использовать ИБП с двойным преобразованием энергии.

«Выпрямительно-зарядные устройства (ВЗУ) входят в состав источников бесперебойного питания постоянного тока и щитов оперативного тока (ШОТ), формирующих шину гарантированного питания постоянного тока четвертого уровня. Электрические параметры ВЗУ:

- напряжение шины - 24, 48, 60, 120, 220 В;
- ток нагрузки 10 – 100 А» [17].

Как в быту, так и в промышленности всегда есть электроприемник с большим пусковым током, в первую очередь это электродвигатели. Чтобы повысить надежность ИСЭЛ АИЭ и защитить ее от бросков пусковых токов рекомендуется включить в состав ИСЭЛ АИЭ устройства плавного пуска (УПП) и подключение линий с бросками тока осуществлять только через это устройство.

Если потребитель провел столь масштабную модернизацию своего энергетического хозяйства (создание ИСЭЛ АИЭ) то необходимо довести ее

до конца и поменять системы управления электроприводами на современные, с частотным управлением. Это не только позволит еще снизить затраты на электроэнергию, но и продлить срок его эксплуатации, что опять же положительно скажется на экономике предприятия. Можно использовать стандартные частотные преобразователи, в большом количестве доступные для приобретения практически на любую мощность от 0,75 до 400 кВт [32].

Так как возобновляемые источники энергии даже теоретически не могут непрерывно вырабатывать электрическую энергию (у солнечных батарей наступает темное время суток, у ветряных электростанций может наступить штиль) то в ИСЭЛ АИЭ необходимо предусмотреть автоматический ввод резерва (АВР) причем сделать его двухступенчатым. На первом уровне условное АВР1 производит переключение от одного сетевого фидера к другому (например, переподключая с солнечной батареи на ветростанцию). На втором уровне проводится подключение еще одного источника энергии, независимого от первых двух источников. Чаще всего это дизель-генераторная установка.

Для объединения оборудования в систему, работающую без перебоев и по заданным алгоритмам, необходимы программно-аппаратные средства управления и мониторинга ИСЭЛ АИЭ.

«ИСЭЛ АИЭ использует открытые протоколы обмена данными между различными элементами через сетевые контроллеры, позволяя создать распределенную инфраструктуру, которая имеет высокую степень открытости для наращивания и модернизации. Ежедневные операции по измерению, получению данных и планированию энергопотреблению выполняются с помощью высококачественных и эргономических машинных интерфейсов и систем наблюдения и контроля. Многофункциональный измерительный контроллер (МИК) и серия регуляторов коэффициента мощности (КРМ) поддерживают протокол Modbus RTU и Modbus ASCII при использовании RS-232 и RS-485 портов. Использование этих функций позволяет считывать показания приборов и

управлять ими с помощью программного обеспечения удаленного контроля DCRJSW» [18].

2.4 Оптимизация систем электроснабжения с участием ветряных и солнечных электростанций

Для измерения качества электроэнергии, вырабатываемой альтернативными генерирующими мощностями, необходимо производить в соответствии с ГОСТ 32144-2013 в котором отражены нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения, стандарта EN 50160.

Схема измерения параметров качества электрической энергии представлена на рисунке 36. Используемое приборное обеспечение. Источник переменного тока - синхронная трехфазная машина в режиме генератора мощностью 500 Вт (см. рисунок 36). Выходное напряжение 12 В. Выпрямитель AC-DC. Преобразователь DC-AC 12/220 В типа E350-12, мощностью 350 Вт. Нагрузка генератора - асинхронные двигатели, светодиодные лампы, компьютер с импульсным источником питания, имитаторы активноиндуктивной (R-L) и активно-емкостной (R-C) нагрузки. Параметры качества электрической энергии исследуемой системы измерялись с помощью анализаторов качества электроэнергии Fluke – 434, Metrel 2892. Синусоидальность выходного напряжения дополнительно контролировалась с помощью цифрового осциллографа GDS – 7220 [33]. Электрические параметры сети, питающей приводной асинхронный двигатель, измерялись и регистрировались с помощью трехфазного анализатора мощности ACM - 3192.

Для оценки электромагнитной совместимости элементов системы выбраны следующие показатели:

- суммарный коэффициент гармонических составляющих кривой тока THDI;

- суммарный коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения THDU;
- коэффициент, характеризующий вклад высших гармоник в процесс нагрева трансформатора, K_factor ;
- пик-фактор тока (CF_i) и напряжения (CF_u);
- максимальные и минимальные значения токов и напряжений, потребляемая мощность.

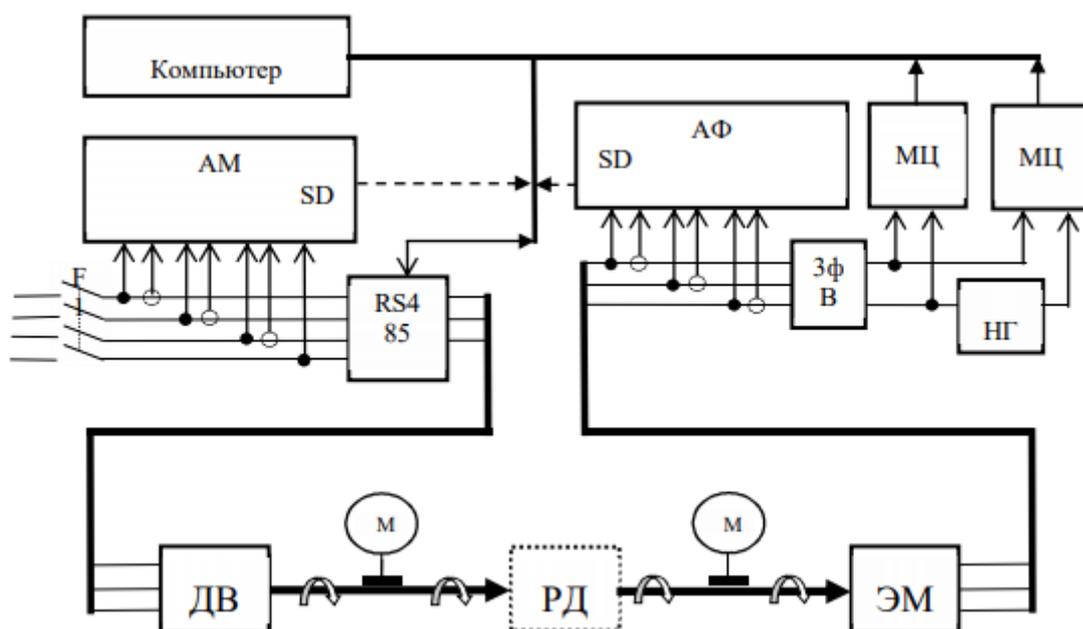


Рисунок 36 - Схема измерения параметров качества электрической энергии автономной системы электроснабжения

Результаты измерений параметров системы электроснабжения автономного потребителя представлены в таблице 3. Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих кривых тока и напряжения составляют 75...85% при использовании простейших преобразователей АС-DC (меандр). В случае использования "чистых" синусных преобразователей суммарный коэффициент гармонических составляющих кривых тока и напряжения составил 18...19% при различных нагрузках.

Таблица 3 – Характеристики системы при различном характере нагрузки

Символ	Параметр	Единица измерения	Тип нагрузки		
			R-C ¹	R-L ¹	R-C ²
I	Ток	А	0,3532	0,3891	204,4
F	Частота	Гц	50,428	49,982	50,079
THD U	THD напряжения	В	33,687	32,048	23,237
THD U	THD напряжения	%	74,396	98,864	18,562
THD I	THD тока	А	0,1757	0,1791	0,0351
THD I	THD тока	%	85,501	82,822	19,219
CFu	Пик-фактор напряжения		4,0955	3,9727	1,5377
CFI	Пик-фактор тока		8,5436	7,5712	3,8654
K-factor	Кратность увеличения потерь		18,8247	20,04	4,8654
Umin	Мин. пик. напряжение	В	-272,1	-196	-198,6
Umax	Макс. пик. напряжение	В	221,92	202,37	189,41
Imin	Мин. пик. ток	А	-3,009	-1,594	-0,790
Imax	Макс. пик. ток	А	1,4444	2,9463	0,651
P	Активная мощность	Вт	20,191	18,887	22,131
Q	Реактивная мощность	вар	-11,82	20,817	-14,4

X¹- форма выходного напряжения преобразователя AC-DC-меандр
X²- форма выходного напряжения преобразователя AC-DC-«чистый минус»

Нормируемые значения данного показателя составляют 8-12%. Увеличение потерь энергии в элементах системы электроснабжения (K_factor) составило от 4 до 20 [34]. При проведении экспериментов наблюдались ложные срабатывания элементов защиты электроприборов и нарушения в работе локальной компьютерной сети. Значения пик-факторов тока и напряжения показывают на взаимодействия источника питания и нагрузки. Анализ полученных результатов показывает нецелесообразность обеспечения нормируемых показателей гармонических искажений

традиционными методами (снижения полного сопротивления сети, применение активных фильтров гармоник и т.д.) даже при использовании качественных преобразователей DC-AC. Существующие тенденции современного потребительского рынка бытовых приборов констатируют все возрастающую долю оборудования с нелинейной характеристикой нагрузки. Перспективные источники электроэнергии и традиционная автономная система электроснабжения бытовых потребителей энергии (220 В переменного тока) не отвечает требованиям электромагнитной совместимости для данной категории потребителей.

Выводы по разделу

В данном разделе рассмотрены различные способы повышения качества электроэнергии, вырабатываемой ветровыми и солнечными электростанциями. Проанализировав различные источники информации, было выяснено, что это возможно сделать по нескольким направлениям:

- за счет модернизации алгоритмов управления;
- за счет оптимизации работы емкостных накопителей энергии;
- за счет применения технических средств.

Рассмотрев различные алгоритмы управления солнечными и ветряными источниками энергии были выбраны наиболее оптимальные варианты, позволяющие повысить качество вырабатываемой электроэнергии. Для применения в солнечных электростанциях выбрана технология MPPT – когда работа контроллера заключается в слежении за точкой максимальной мощности. Эффект от внедрения данной технологии – повышение вырабатываемого количества электроэнергии на 20%. Для определения местоположения точки рекомендуется использовать алгоритм дополненной проводимости.

Для оптимизации работы ветряных электростанций рекомендуется внедрить принцип поиска максимума мощности, что позволяет увеличить

токоотдачу генератора во всем ветровом диапазоне. Это также можно сделать с применением технологии МРРТ.

Оптимизацию работы блоков аккумуляторных батарей, рекомендуется использовать контроллер заряда/разряда, работающий по разработанному алгоритму (см. рисунок 33). Кроме этого был предложен ряд профилактических мероприятий, направленных на повышение качества работы емкостных накопителей энергии.

Предложена структурная схема интеллектуальной системы электроснабжения автономных источников энергии (ИСЭЛ АИЭ), позволяющая поддерживать качество электрической энергии в локальной системе электроснабжения на стабильно высоком уровне. Это достигнуто применением современного высокотехнологичного, интеллектуального измерительного, защитного, коммутационного, распределительного, преобразовательного оборудования.

3 Вопросы оптимизации технико-экономических характеристик систем электроснабжения

3.1 Технико-экономические аспекты проектирования гибридных электростанций

Изменение энергетических характеристик, представленных в данной работе возобновляемых энергоисточников: движения воздуха и солнечного света существенно ограничивает способность создать автономный генераторный комплекс только на базе солнечной или ветровой электростанции. Например, теоретический потенциал солнечного света летом на Европейской части территории нашей страны превышает зимнюю освещенность в 10 и более раз. Достаточно сильно отличаются по сезонам и энергетические характеристики ветра. Исходя из оптимальных технико-экономических показателей, автономная возобновляемая электроэнергетика без дополнительных источников энергии может использоваться лишь для электрификации потребителей с небольшой нагрузкой, ориентировочно до нагрузки 10 кВт. В случае больших установленных нагрузок рекомендуются гибридные ветро-дизельные, солнечно-дизельные или солнечно-ветро-дизельные энергокомплексы с различной степенью присутствия в генерации различных источников энергии.

«Состав и структура гибридного энергетического комплекса зависят от временных изменений энергетического потенциала возобновляемого энергоресурса и электропотребления объекта. С экономической точки зрения автономный гибридный комплекс предполагает существенное увеличение стоимости энергетического оборудования при неизменных объемах производимой электроэнергии. Это приводит к ухудшению экономических показателей, например, к ограничениям возможностей снижения тарифа на электроэнергию. Положительными особенностями являются: экономия топлива и моторесурса ДЭС, большой срок службы энергетического

оборудования установок возобновляемой энергетики, повышение надежности электроснабжения, улучшение экологической обстановки. Таким образом, задачей рационального построения гибридной системы электроснабжения является обеспечения наилучших техникоэкономических показателей по сравнению с базовым – дизельным вариантом» [18].

Алгоритм создания гибридного энергокомплекса, в виде структурного взаимодействия приведен на рисунке 37. Исходными параметрами для построения системы являются энергетические параметры объекта электрификации: максимальная мощность и количество потребляемой электроэнергии за каждый месяц в течение года. Параметры электропотребления желательно рассматривать за несколько лет, например, за 5-10 летний отрезок времени. Другой группой данных для проектирования являются энергетические характеристики ветра и солнца в месте строительства гибридного автономного комплекса. Эти параметры определяются на базе статистических данных метеонаблюдений. В результате обработки метеоданных определяется актуальный для данной местности вид возобновляемого источника энергии. По энергетическим параметрам приоритетного ВИЭ и объекта электрификации из баз данных в первом приближении выбираются энергетические машины возобновляемой компоненты альтернативного энергокомплекса. Определяется количество производимой «чистой» электроэнергии и составляется помесичный сводный баланс потребляемой и производимой электроэнергии. Чаще всего, в разные времена года возможен как лимит, так и перебор «зеленой» энергии. Недостаток в энергии должен покрываться ДЭС, а избыток следует рассматривать, как недостаточно точное проектирование установленной мощности ВИЭ.

На стадии анализа энергетического баланса выбирается структура системного комплекса и требуемая дизель-электрическая станция. На следующей стадии проводится определение финансовых показателей

рассматриваемого комплекта энергокомплекса и сравнение их с базовым вариантом – когда источник электричества один, и это ДЭС.



Рисунок 37 - Структурная схема алгоритма построения гибридного энергокомплекса

Используя данные экономических характеристик выполняется корректировка энергетического баланса, а, следовательно, оценивается участие возобновляемой и дизельной частей гибридной системы с целью увеличения её экономической эффективности. Таким образом, в результате анализа возможностей построения гибридной системы выбирается рациональный комплект, который и принимается к реализации. Применение оптимизационных методов ускоряет время поиска оптимального варианта

энергокомплекса при известных ограничениях и с учетом дискретности комплекта.

3.2 Методы оптимизации систем электроснабжения с участием ветряных, солнечных и приливных электростанций

По причине низкой энергетической плотности возобновляемых энергоресурсов (ВЭ) и их случайной изменчивости, стоимость вырабатываемой электроэнергии с применением ВЭ в наше время обычно значительно больше тарифа на электроэнергию, полученную на традиционных электростанциях. Поэтому конкурентоспособной отраслью нетрадиционной энергетики остается малая энергетика, преимущественно в децентрализованных сетях электроснабжения потребителей, территориально расположенных в отдаленных местах. Для результативной организации децентрализованного электроснабжения с использованием ВЭ необходимо учитывать следующие моменты:

- оценка объемов и условий электроснабжения объектов, не имеющих общего электроснабжения;
- оценка теоретического количества энергии от возобновляемых энергоресурсов в зоне размещения системы электрификации и выбор приоритетных видов возобновляемой энергии;
- разработка способов и проведение анализа технико-экономических характеристик различных схем построения децентрализованных сетей электроснабжения;
- разработка показателей экономической эффективности применения децентрализованных систем подачи электричества;
- анализ социальных и экологических аспектов применения ВЭ для локального электроснабжения объекта;

- проработка возможных организационно-правовых форм функционирования создаваемого энергобизнеса в локальных зонах энергообеспечения;

- разработка предложений по совершенствованию юридической базы для осуществления данного направления бизнеса по производству электроэнергии.

Исследование актуальной проблемы необходимо провести с учетом следующих аспектов. «Комплексный подход к оценке экономической и энергетической эффективности децентрализованных зон с различными типами энергоисточников. Региональные, климатические, географические факторы при определении условий экономической и энергетической эффективности функционирования децентрализованных систем энергообеспечения. Тенденции развития и изменения зон децентрализованного энергоснабжения. Тенденция развития энергоустановок, использующих местные, в том числе возобновляемые энергоресурсы. Оценка эффективности применения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии для электроснабжения автономных объектов, не имеющих централизованного электроснабжения, производится на основе сравнительного технико-экономического анализа всех возможных вариантов электрификации. При этом необходимо рассмотреть варианты электроснабжения не только от нетрадиционных источников энергии, но и вполне традиционных: централизованная энергосистема и жидко-топливные генераторы. Электроснабжение от энергосистемы предусматривает строительство линии электропередачи, а в качестве жидко-топливных генераторов наиболее распространены дизельные электростанции» [19].

С учетом сказанного, к возможным комплектам электроснабжения автономного объекта отнесены:

- централизованный подвод электричества (строительство ЛЭП);
- ДЭС и бензоэлектростанции;
- ветроэнергетические комплексы;

- солнечные электростанции;
- комбинированные энергетические комплексы.

Чтобы сравнить между собой различные варианты получения на объекте электроэнергии нужны показатели эффективности. Целесообразно производить сравнение по трем критериям: техническим, экономическим и социально-экологическим. В группу технических критериев входит один показатель – возможность технической выполнимости строительства электростанции. Критерий возможности выполнимости проекта на основе дизельных генераторов всегда положителен.

Если провести электроснабжения от единой энергосистемы, то с точки зрения критерия, требуется знание о необходимой установленной нагрузки объекта электроснабжения P (кВт) и длина линии до централизованной линии L (км). Для ветроэнергетической системы критерием является действительная скорость ветра на уровне ступицы лопастей V_{cp} (м/с). Для электростанций на фотоэлементах среднемесячная солнечная энергетическая освещенность E (кВт·ч/м²).

Главным критерием экономической целесообразности являются приведенные материальные затраты на 1 кВт установленной нагрузки системы электроснабжения.

В качестве социально-экологических критериев целесообразности применения различных комплектов электроснабжения можно использовать следующие критерии:

- возможная угроза жизни людей;
- необходимость наличия топлива;
- отчуждение земли;
- нахождение в зоне работы на птиц и животных;
- акустическое излучение и вибрация;
- волновое излучение.

Вполне очевидно, что количественная оценка социально-экологических критериев достаточно затруднительна, а иногда и

невозможна, и при анализе выполняется только их эмпирическая оценка, которая вполне может служить показателем дополнительного критерия в случае выбора наиболее оптимального варианта электроснабжения локального объекта. По вопросам проектирования и оптимизации СЭС, использующих ВИЭ, опубликовано значительное количество материалов. Следует отметить публикации, рассматривающие автоматизированные программные комплексы для проектирования. «Наибольшее распространение в настоящее время имеют комплексы HOGA – Hybrid optimization by genesis algorithm (Испания), HOMER – Hybrid optimization modeling software (США), HYPORA – Hybrid power optimized for rural/remote areas (США)» [20].

HOGA представляет из себя программу моделирования и оптимизации электрических систем, использующих возобновляемые виды энергии. Цель оптимизации заключается в минимизации общих затрат системы за время эксплуатации. Можно принять за целевую функцию число выбросов углекислого газа в атмосферу. Для решения оптимизационной функции используется генетический расчет. Математическая модель алгоритма включает модели нескольких элементов: ФЭП, ВЭУ, ДЭС, АБ, микро-ГЭС, топливных и др.

HOMER – программа, направленная решать задачи функциональной оптимизации и коррекции установленных мощностей базового генерирующего оборудования. В расчетной модели используются такие элементы как ВЭУ, ФЭП, ДЭС, АБ, микро-ГЭС, топливные элементы, средства производства и использования водорода, балластные блоки. В качестве критериальных функций могут быть использованы капиталовложения, потребление невозобновляемого топлива, выбросы в атмосферу. Данная программа является наиболее используемым в рассматриваемой части энергетики.

HYPORA – это программа для решения задач функциональной оптимизации СЭС, работающих на энергии Солнца, ветра, биомассы. В

качестве критериальной функции рассматривается цена получаемой электроэнергии. Главной особенностью данного продукта является возможность изменения базовой программы. HYPORA менее распространен по сравнению с HOGA и HOMER. Представленные расчетные модели оптимизационных алгоритмов реализованы с применением различных средств имитационного программирования: C++, MS, Excel, JAVA, и др. Преимущество названных оптимизационных комплексов заключается в возможности решения проблемы выбора оптимальная величина мощности генерирующей станции различной физической основы. Представленные программные средства имеют удобный интерфейс для пользователя, что упрощает их применение.

«Недостатками указанных комплексов являются следующие:

- оценка ветроэнергетического потенциала по среднегодовой или среднемесячной скорости ветра при невозможности учета случайного характера этой скорости;
- использование в математических моделях среднемесячной солнечной радиации, характеризующейся циклическими суточными изменениями;
- отсутствие корреляции между параметрами окружающей среды и параметрами энергетического оборудования;
- отсутствие возможности выполнения электрических расчетов и учета потерь электроэнергии в системе электроснабжения;
- отсутствие возможности детализации капиталовложений в строительство и эксплуатацию СЭС;
- невозможность изменять структуру комбинированной системы электроснабжения и дополнять ее новыми элементами» [21].

Оптимизация системы и параметров локальных энергокомплексов с использованием ВИЭ должна выполняться с учетом разнообразных требований. Природные явления и атмосферные процессы величины не стабильные, часто изменяющиеся, поэтому для большей достоверности желательно располагать результатами наблюдения за ветром и солнцем не

менее десяти лет. Необходимо на стадии проекта внести возможные экономические траты, причем не только на закупку основного генерирующего оборудования, но и затраты строительной части, эксплуатационные и т.д. Необходимо заранее составить алгоритм взаимодействия всех источников энергии, участвующих в работе проектируемой автономной системы электроснабжения, не забывая про их срок эксплуатации, возможность ремонта, замены на аналоги.

Выводы по разделу

Оптимизация технико-экономических характеристик должна начинаться с выбора главного критерия – что именно вы хотите улучшить? Здесь есть много вариантов, и каждый из них повлияет на последующее проектирование автономной СЭС, потому что цель – уменьшить количество выбросов углекислого газа в атмосферу, значительно отличается от цели – отказаться от централизованного электроснабжения. Очевидно, в данном примере будут применены различные подходы к выбору возможного оборудования, из стоимости и т.д. На конечном этапе проектирования автономной СЭС желательно воспользоваться специализированным программным обеспечением, например, применить программный комплекс HOMER.

Заключение

Данная магистерская диссертация посвящена разработке предложений по повышению качества электроэнергии для ветряных, солнечных и приливных электростанций. Ветряные и приливные электростанции имеют принципиально похожие конструкции, поэтому предложения для них одинаковы.

Качество электроэнергии зависит не только от источника, генерирующего энергию, но и главным образом от системы, т.е. совокупности множества электрических приборов и устройств, через которые электрическая энергия передается от места производства к месту потребления.

Разработка предложений по повышению энергоэффективности альтернативных источников энергии (ветряных, солнечных и приливных электростанций) позволяющих повысить качество электроэнергии, является актуальной задачей.

Изучение современного состояния уровня техники и технологии в области производства, передачи и снабжения потребителей электрической энергией выявило основные направления, в которых возможно улучшение работы электрических сетей – более стабильные характеристики качества напряжения в области выбросов и просадки уровней, частотных колебаний, искажения формы, прохождения импульсов.

Проанализировав различные источники информации, было выяснено, что это возможно сделать по нескольким направлениям:

- за счет модернизации алгоритмов управления;
- за счет оптимизации работы емкостных накопителей энергии;
- за счет применения технических средств.

Рассмотрев различные алгоритмы управления солнечными и ветряными источниками энергии были выбраны наиболее оптимальные варианты, позволяющие повысить качество вырабатываемой электроэнергии.

Для применения в солнечных электростанциях выбрана технология МРРТ – когда работа контроллера заключается в слежении за точкой максимальной мощности. Эффект от внедрения данной технологии – повышение вырабатываемого количества электроэнергии на 20%. Для определения местоположения точки рекомендуется использовать алгоритм дополненной проводимости.

Для оптимизации работы ветряных электростанций рекомендуется внедрить принцип поиска максимума мощности, что позволяет увеличить токоотдачу генератора во всем ветровом диапазоне. Это также можно сделать с применением технологии МРРТ.

Оптимизацию работы блоков аккумуляторных батарей, рекомендуется использовать контроллер заряда/разряда, работающий по разработанному алгоритму. Кроме этого был предложен ряд профилактических мероприятий, направленных на повышение качества работы емкостных накопителей энергии.

Предложена структурная схема интеллектуальной системы электроснабжения автономных источников энергии (ИСЭЛ АИЭ), позволяющая поддерживать качество электрической энергии в локальной системе электроснабжения на стабильно высоком уровне. Это достигнуто применением современного высокотехнологичного, интеллектуального измерительного, защитного, коммутационного, распределительного, преобразовательного оборудования.

Список используемых источников

1. Аникин А.С., Мартьянов А.С. Математическая модель литийжелезо-фосфатной аккумуляторной ячейки и батареи на ее основе // В сборнике: Наука ЮУрГУ. Материалы 67-ой научной конференции. Секция технических наук. — 2016. — С. 1152—1156
2. Безруких, П.П. Состояние, перспективы и проблемы развития возобновляемых источников энергии / П.П. Безруких, Д.С. Стребков // Малая энергетика. – М.: НИИЭС, 2016. – №1–2(2–3). – С.6–12.
3. Белей, В.Ф. Анализ технических характеристик ВЭУ ведущих фирм мира / В.Ф. Белей, А.Ю. Никишин // Международная научная конференция «Инновации в науке и образовании - 2016»: сб. докл. / КГТУ. Калининград: Изд-во КГТУ, 2016.
4. Ваулин С.Д., Ганджа С.А., Мартьянов А.С. Электрический генератор для газотурбинной установки // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС. — 2017. — 19(159). — С. 35— 41.
5. В.Р. Огороков, И.О. Волкова, Р.В. Огороков. Интеллектуальные энергетические системы: технические возможности и эффективность. Академия энергетики, № 3, 2019.– С.74-82.
6. В. Климов, Ю. Карпиленко, В. Смирнов. Компенсаторы реактивной мощности и мощности искажения в системах гарантированного электропитания промышленного назначения. Силовая Электроника. 2018. №3.
7. Ганджа, С.А. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для автономных и сетевых ветроэнергетических установок / С.А. Ганджа // Альтернативная энергетика и экология. – М: НИИЭС. – 2018 – №1. – С.25–28.

8. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Официальное издание. [Электронный ресурс] : Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения: 20.11.2021)

9. Зубова Н.В. Методы оптимального управления ветроэнергетической установкой по критерию энергетической эффективности / Н.В. Зубова, С.Н. Удалов, В.З. Манусов // Материалы 5 Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». – Томск: Изд-во ТПУ, 17–18 мая 2017 г., с.16–19.

10. Иванов С.Н., Логинов Е.Л., Михайлов С.А. Энергосбережение: проблемы достижения энергоэффективности. Монография. – М.: НИЭБ, 2019.

11. Иванов Т.В., Иванов С.Н., Логинов Е.Л., Наумов Э.Б. Интеллектуальная энергетика: стратегический тренд международной конкурентоспособности России в XXI веке. – М.: НП ИНВЭЛ, 2017.

12. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SmartGrid. – М.: ИАЦ Энергия, 2016.

13. Киндряшов А.Н., Мартьянов А.С., Соломин Е.В. Электрические машины ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС. — 2016. — 1-2. — С. 59—62.

14. Ледин С.С., Игнатичев А.В. Развитие промышленных стандартов внутри- и межсистемного обмена данными интеллектуальных энергетических систем // Автоматизация и ИТ в энергетике, 2016, № 10.

15. Мавлоназаров М.А., Ошурбеков О.Ш. Особенности интеллектуальных систем электроснабжения фермерских хозяйств // Электрические сети: Надежность, Безопасность, Энергосбережение и

Экономические аспекты: сборник статей Международной научно–практической конференции (Казань, 7 апреля 2021г.). – Казань: КГЭУ, 2021. – 87-90 С.

16. Мавлоназаров М.А., Ошурбеков О.Ш. Автономные системы электроснабжения для фермерских хозяйств // Электрические сети: Надежность, Безопасность, Энергосбережение и Экономические аспекты: сборник статей Международной научно–практической конференции (Казань, 7 апреля 2021г.). – Казань: КГЭУ, 2021. – 91-93 С.

17. Мартьянов А.С. Моделирование алгоритмов заряда аккумуляторной батареи // В сборнике: Наука ЮУрГУ. Материалы 67-ой научной конференции. Секция технических наук. — 2015. — С. 1165— 1171.

18. Натхо И.Ю. Особенности модернизации электроэнергетической подсистемы региона // Социально-экономические проблемы развития Южного макрорегиона. Выпуск 25. Краснодар: ЮИМ, 2017.

19. Ошурбеков О.Ш., Мавлоназаров М.А. Повышение качества электроэнергии вырабатываемой альтернативными источниками энергии // Электрические сети: Надежность, Безопасность, Энергосбережение и Экономические аспекты: сборник статей Международной научно–практической конференции (Казань, 7 апреля 2021г.). – Казань: КГЭУ, 2021. – 117-120 С.

20. Ошурбеков О.Ш., Мавлоназаров М.А. Особенности моделирования гибридных электростанций // Электрические сети: Надежность, Безопасность, Энергосбережение и Экономические аспекты: сборник статей Международной научно–практической конференции (Казань, 7 апреля 2021г.). – Казань: КГЭУ, 2021. – 121-124 С.

21. Правила устройства электроустановок /6-е и 7-е изд. перераб. и доп. с изменениями. М.: ЗАО Энергосервис, 2016.

22. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / Коллектив авторов под общей редакцией П.П. Безруких. – СПб: Наука, 2016.

23. Светлицкий С.Ю., Иванов С.Н., Логинов Е.Л., Михайлов С.А. Модернизация энергетики России: проблемы, пути решения, перспективы. М.: НИЭБ, 2016.

24. Специальный доклад МГЭИК по возобновляемым источникам энергии и смягчению воздействий на изменение климата. Техническое резюме. Под редакцией О.Эденхофера, Р.Пичс-Мадруги, Ю.Соконы. [Электронный ресурс] : URL: https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_ru.pdf (дата обращения: 20.11.2020)

25. Толмачев В.Н., Орлов А.В., Булат В.А. Эффективное использование энергии ветра в системах автономного энергообеспечения. – СПб: ВИТУ, 2016. – 203 с.

26. Удалов С. Возобновляемые источники энергии: Учебник. – Новосибирск, Изд. НГТУ, 2017.

27. Электроснабжение объектов. Ч.1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования: учебное пособие/А.В. Кабышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – 185с.

28. Электроэнергетика России 2030: Целевое видение / Под общ. ред. Б.Ф. Вайнзихера. – М.: Альпина Бизнес Бук, 2018.

29. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии / Коллектив авторов под ред. В.Н. Виссарионова. – Москва, ООО фирма «ВИЭН», 2017.

30. Dugan R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill, 2016. - 265 стр.

31. Fiorina J.N. Inverters and Harmonics // Cahier Technique Merlin Gerin, no 159. - 19 стр.

32. Forrester W. Networking in Harmony // Electrical Contractor, Nov. / Dec., 2020, стр. 38-39.31. Reactive Power Compensation [Electronic resource] : informational portal «Power Needs Control». URL:

<https://www.etigroup.eu/solution/reactive-power-compensation> (дата обращения: 15.03.2021)

33. Harmonic Disturbances in Networks and Their Treatment // Cahier Technique Schneider Electric, no 152. - 25 стр.

34. Yacamini R. Power System Harmonics. Part 3 - Problems caused by distorted supplies // Power Engineering Journal, Oct., 2017, стр. 233-238.